Stazione Sperimentale per i Combustibili
San Donato Milanese

°°°°°°°°°°°°°°°

PROGETTO PARFIL
PLG 1

LE TECNOLOGIE DI RETROFITTING PER LA RIDUZIONE DELL'EMISSIONE DI PARTICOLATO DEGLI AUTOVEICOLI

Stato dell'arte

Francesco Avella
Davide Faedo

Rapporto tecnico SSC N. 200700764
Commessa di ricerca N. 12.7.3 gennaio 2007

Stazione Sperimentale per i Combustibili
San Donato Milanese
°°°°°°°°°°°°°°°°

PROGETTO PARFIL PLG 1

LE TECNOLOGIE DI RETROFITTING PER LA RIDUZIONE DELL'EMISSIONE DI PARTICOLATO DEGLI AUTOVEICOLI
Stato dell'arte

Francesco Avella
Davide Faedo

Presentazione del rapporto

Questo rapporto presenta un'indagine bibliografica svolta dalla Stazione sperimentale per i Combustibili nell'ambito del ***Progetto PARFIL - Il Particolato Atmosferico Fine nella Regione Lombardia*** - riguardante lo stato dell'arte sulle tecnologie di abbattimento del particolato (DPF) da impiegare come *retrofit* per gli autoveicoli diesel commerciali e per il trasporto delle persone (bus urbani e turistici) già in circolazione. Nel rapporto sono illustrati i principali sistemi sviluppati per ridurre efficacemente l'emissione del particolato, la problematiche nel loro impiego e le metodologie messe in atto per la loro validazione (mantenimento dell'efficienza nel tempo), basate su procedure sperimentali in campo e in laboratorio.

Il ***PARFIL*** *(*www.flanet.org/ricerca/**parfil**.asp.) *è un Progetto triennale di ricerca sulla formazione e sulla distribuzione del* PM_{10} *nelle aree critiche della Regione Lombardia, parzialmente finanziato con fondi del MATT, dell'APAT, della Regione Lombardia, della Provincia e del Comune di Milano.*

I principali obiettivi del Progetto, in cui sono coinvolti Dipartimenti dell'Università di Milano e Enti di ricerca qualificati, tra cui l'ARPA Lombardia e la Stazione Sperimentale per i Combustibili, riguardano la raccolta e l'elaborazione dei dati di particolato atmosferico rilevati nella Regione Lombardia con metodologie convenzionali e non (via satellite), la valutazione dei fattori di emissione delle principali fonti, la caratterizzazione chimico-fisica del particolato fine atmosferico e lo sviluppo di modelli previsionali della concentrazione di particolato nell'aria. Esso costituisce il naturale proseguimento del Progetto PUMI (Particolato Fine nell'Atmosfera Urbana Milanese).

Prefazione

Questo documento è stato preparato come parte dell'attività della seconda annualità del PLG1 del Progetto PARFIL. L'obiettivo è quello di fornire alle autorità interessate e agli studiosi dei problemi ambientali un quadro di carattere generale sui numerosi sistemi proposti recentemente sul mercato per l'abbattimento del particolato emesso dagli autoveicoli diesel. L'interesse nasce dal fatto che l'applicazione di questi sistemi può costituire un potente ed efficace espediente da mettere in atto per contenere l'impatto sulla qualità dell'aria determinato dal traffico automobilistico in Lombardia.
Nel corso di oltre quindici anni sono stati studiati, realizzati e proposti sul mercato internazionale numerosi sistemi di filtrazione da applicare sia nella produzione in serie dei nuovi autoveicoli che come retrofit a quelli già in circolazione. Come documentato dall'abbondante letteratura tecnica sull'argomento, tali sistemi sono in grado di abbattere in modo efficace l'emissione del particolato degli autoveicoli diesel, anche la frazione più fine, considerata tuttora l'inquinante più pericoloso presente nell'aria dei centri urbani.
In quest'ambito i dispositivi antiparticolato apparsi sul mercato sono stati oggetto di grande attenzione da parte degli enti preposti alla salvaguardia dell'ambiente e delle autorità governative. Infatti essi costituiscono una possibile strada da percorre per abbassare in modo sensibile il livello del particolato emesso dagli autoveicoli diesel di vecchio modello, ancora in circolazione, poiché ritenuti a ragione quelli più inquinanti.
Soltanto recentemente la tecnologia in questo settore ha raggiunto un elevato grado di maturità. I principi e i metodi su cui si basa il funzionamento dei sistemi antiparticolato, però, sono ancora poco conosciuti e questo porta inevitabilmente a manifestare da parte di chi deve prendere provvedimenti perplessità e incertezze circa i benefici che realmente ne potrebbero derivare con una loro applicazione diffusa.
L'oggetto di questo rapporto è una breve rassegna sullo stato dell'arte delle tecnologie di filtrazione dei gas di scarico, già disponibili sul mercato internazionale e impiegabili come retrofit per ridurre l'emissione del particolato degli autoveicoli diesel in circolazione.
Nel rapporto vengono illustrati i principi di funzionamento e le caratteristiche costitutive e funzionali dei sistemi di filtrazione più interessanti e le problematiche inerenti al loro impiego. Viene data, inoltre, una breve descrizione delle principali caratteristiche tecniche e funzionali di alcuni sistemi proposti negli ultimi anni sul mercato nazionale ed europeo.
La documentazione raccolta per la preparazione del documento indica che molti dei sistemi proposti sono stati sufficientemente testati da enti "super partes" secondo criteri di valutazione severi, come è stato dimostrato in campagne sperimentali di lunga durata svolte all'estero, sia in Europa (Svizzera, Svezia) che negli Stati Uniti.
Questi progetti sperimentali, infatti, sono stati eseguiti con l'intento di assicurare alle autorità governative locali di adottare i sistemi di riduzione del particolato tecnologicamente più affidabili tra quelli disponibili (sotto entrambi gli aspetti tecnico ed economico) per adeguare intere flotte di autoveicoli per il trasporto pubblico e di merci.

LE TECNOLOGIE DI RETROFITTING PER LA RIDUZIONE DELL'EMISSIONE DEL PARTICOLATO DEGLI AUTOVEICOLI DIESEL

Indice degli argomenti

1. INTRODUZIONE

I motori diesel trovano una grande diffusione nella propulsione di autoveicoli di piccole, medie e grandi dimensioni e di autoveicoli *non—road*.

Sebbene i motori diesel costituiscano la categoria di propulsori a combustione interna maggiormente apprezzata per le sue elevate prestazioni e per i consumi di combustibile ridotti, essi presentano lo svantaggio di emettere quantità significative di materiale particolato e di ossidi di azoto, oltre che quantità più modeste di altri inquinanti.

Nonostante i progressi tecnologici sui motori diesel siano stati notevoli nel corso degli ultimi dieci anni e abbiano portato a una sensibile riduzione dell'emissione del particolato (dal limite di 140 mg/km delle autovetture e degli autoveicoli commerciali leggeri Euro 1 al valore di 25 mg/km di quelli omologati Euro 4, fino al limite previsto di 5 mg/km per l'Euro 5), gli autoveicoli diesel costituiscono ancora una delle principali fonti di emissione del particolato nell'atmosfera dei grandi centri urbani, come Milano. Gli effetti negativi sull'ambiente sono risultati sempre più marcati come conseguenza del forte incremento del trasporto merci su gomma, oltre che dell'aumento sensibile delle immatricolazioni delle autovetture con motore diesel.

L'analisi dimensionale del particolato eseguita in laboratorio con le diverse apparecchiature attualmente disponibili e riportati nella cospicua letteratura tecnica specifica, ha indicato che il particolato generato dalla combustione nei motori diesel si presenta in massima parte come particolato fine e ultrafine. Infatti, oltre il 95 % dell'emissione espressa in numero di particelle/km percorso presenta un diametro Dp (aerodinamico o di mobilità elettrica, in dipendenza del tipo di strumentazione adottata) inferiore a 1 μm.

La struttura chimica del particolato diesel è alquanto complessa: esso è costituito da nuclei di materiale carbonioso sui quali sono adsorbiti idrocarburi, tra i quali gli IPA, i nitro-IPA e altre sostanze organiche, acqua, solfati e materiali inorganici generati dall'usura delle parti metalliche del motore.

Anche la struttura morfologica si presenta complessa: l'aspetto del particolato dei motori diesel al SEM è simile a quello di grappoli costituiti da particelle carboniose primarie, a struttura fullerenica, di piccolissime dimensioni (ordine di grandezza 2 - 4 nm), collegate tra loro da "ponti" di sostanze organiche condensate (tra le quali gli IPA, i N-IPA, fenoli e N-fenoli) per formare agglomerati di dimensioni maggiori, prevalentemente in modo nucleazione (Dp < 40 nm) e in modo accumulazione (Dp > 100 nm). La superficie degli agglomerati può raggiungere valori prossimi a 200 m^2/g, per cui il particolato risulta essere un potente adsorbente.

Dato che la maggior parte del particolato emesso dai motori diesel presenta dimensioni inferiori a 0,1 μm, le particelle inalate raggiungono e si depositano facilmente nelle vie più profonde dell'apparato respiratorio attraverso i bronchi. Quelle più fini possono anche attraversare le sottili membrane degli alveoli polmonari passando nel sangue. Le particelle depositate rimangono apparentemente immutate nel tempo, ma la reazione delle cellule localmente è quella tipica del "rigetto" di un corpo estraneo con manifestazioni di una irritazione locale. In alcuni casi la presenza di sostanze tossiche, quali alcune specie di IPA e di N-IPA adsorbite sulle nanoparticelle disperse nell'organismo, caratterizzate da azione mutagena e cancerogena, possono determinare l'insorgere del cancro. Lo IARC, infatti, classifica il particolato diesel come "probabile cancerogeno".

Per ridurre l'impatto determinato dalla combustione nei motori diesel sulla qualità dell'aria (esiste anche un particolato generato dall'usura delle parti meccaniche degli

autoveicoli quali la frizione, i freni e gli pneumatici) sono state escogitati numerosi dispositivi in grado di limitare l'emissione di questa specie inquinante.
Sebbene il concetto di filtrazione è abbastanza intuitivo, poiché riguarda la separazione con mezzi meccanici di una fase solida finemente dispersa in una fase gassosa (gas di scarico), il maggiore ostacolo alla diffusione delle trappole antiparticolato sugli autoveicoli è costituito dalla difficoltà di rigenerare il dispositivo di filtrazione quando la quantità di fuliggine accumulata sulla sua superficie raggiunge un livello inaccettabile per il funzionamento regolare del motore.
Nel corso degli ultimi anni sono state sviluppate numerose tecniche per rigenerare i sistemi di filtrazione, come è documentato dalla abbondante letteratura specifica sull'argomento, ma solo quelle caratterizzate da un'elevata efficacia, semplicità e affidabilità nell'autorigenerazione e una lunga durata hanno avuto successo.
I filtri antiparticolato sono applicati già da alcuni anni nella produzione in serie di autovetture diesel, mentre stanno per essere posti sul mercato anche autoveicoli diesel pesanti, di modello tecnologicamente più avanzato (Euro 4 ed Euro 5), dotati di dispositivi di filtrazione associati o meno a sistemi di riduzione dell'emissione degli ossidi di azoto (catalizzatori de-NOx).
Nello stesso tempo sono stati sviluppati e resi disponibili sul mercato anche sistemi di filtrazione del particolato da installare come retrofit sugli autoveicoli già in circolazione.
Questo prospettiva risulta essere estremamente interessante da parte delle autorità governative locali in quanto l'applicazione diffusa di dispositivi antiparticolato su autoveicoli esistenti di modello più vecchio, e quindi più inquinanti, possono costituire uno dei possibili strumenti di controllo per contenere efficacemente l'impatto determinato dal traffico sulla qualità dell'aria nell'ambiente urbano.
Numerosi programmi sperimentali pilota sono stati sviluppati in Europa, USA e Giappone per verificare l'efficienza dei dispositivi proposti sul mercato e valutarne l'effettivo beneficio che ne deriverebbe, a livello locale, con l'applicazione diffusa sulle flotte di autoveicoli adibiti al trasporto pubblico e privato e delle merci. La valutazione globale dell'adeguamento di una flotta di autoveicoli va naturalmente considerata in termini di costi/benefici, ossia tenendo conto anche dell'aspetto economico degli investimenti necessari per l'adeguamento del parco autoveicoli.

2. CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE E FUNZIONALI DEI FILTRI ANTIPARTICOLATO

2.1 Tipologie, costituzione e funzionamento dei filtri antiparticolato

I sistemi di filtrazione del particolato proposti sul mercato possono classificarsi in due tipologie differenti in base al criterio di filtrazione scelto: sistemi a flusso a parete (*Wall-Flow Particulate Filter*) e sistemi a flusso parzialmente libero (*Flow-Through Diesel Filter*). Entrambe sono costituite da quattro elementi fondamentali:

- il **substrato**, ossia il corpo filtrante vero e proprio che trattiene il particolato disperso nei gas di scarico
- l'**involucro** in cui è alloggiato il substrato, che deve essere isolato termicamente, fonoassorbente e antivibrante
- il **sistema di controllo** e di gestione della rigenerazione, che provvede a modificare all'occorrenza la regolazione (portata) e la fasatura (anticipo) di iniezione del motore con lo scopo di innalzare rapidamente e per breve tempo la temperatura dei gas di scarico o attivare particolari dispositivi (fili caldi, bruciatori, ecc.) per la combustione della fuliggine accumulata
- il **sistema elettronico di diagnostica a bordo** (**OBD**), posizionato nella cabina dell'autoveicolo, in modo da avvisare l'autista della presenza di un eventuale guasto al sistema di filtrazione o del momento in cui si deve intervenire per la sua manutenzione.

I quattro elementi sono generalmente forniti da uno stesso produttore di filtri, a garanzia del buon funzionamento nel tempo dell'intero sistema di abbattimento del particolato. Questa condizione è normalmente richiesta dai Costruttori per la produzione in serie di motori e autoveicoli.

Il **substrato** è costituito da una struttura di materiale con notevole resistenza agli sbalzi termici e con elevata porosità, in grado di trattenere il particolato con un'elevata efficienza (superiore al 90 %). I materiali più usati, caratterizzati da un'elevata superficie specifica (1 – 3 m^2 per un litro di volume attraversato dai gas di scarico), sono quelli di tipo ceramico e quelli costituiti da metalli sinterizzati.

I sistemi convenzionali (*Wall-Flow Filters*) sono ottenuti per estrusione di materiali ceramici (SiC, cordierite, strutture in fibra ceramica) in un unico blocco. Strutturalmente essi si presentano come un monolito con struttura a nido d'ape in cui i canali sono chiusi alternativamente a un'estremità, così da lasciare fluire i gas di combustione attraverso i pori e trattenere le particelle carboniose (Fig. 1). Generalmente il SiC (monoliti prodotti da NOTOX, IBIDEN, HEIMBACH) è preferito alla cordierite (monoliti prodotti da CORNING e NGK) per la sua maggiore resistenza meccanica e termica e per una maggiore efficienza di trattenimento del particolato. Più recentemente i substrati sono costruiti anche in materiale metallico sinterizzato. Essi presentano una struttura cellulare simile a quella dei materiali ceramici dei monoliti convenzionali.

Alcuni substrati sono costruiti sotto forma di cartucce in fibra di ceramica (*Deep-Bed Filters*) tessuta (mullite, presente sul mercato col nome commerciale di NEXTEL prodotta dalla 3M e dalla MANN & HUMMEL) o intrecciata (sviluppata dalla BUCK), che

presentano una maggiore resistenza agli *shock* termici e una maggiore resistenza meccanica rispetto ai monoliti (Fig. 2).
I sistemi innovativi a flusso parzialmente libero (*Flow-Through Filter*), realizzati in metallo sinterizzato, rappresentano una nuova tecnologia sviluppata dalla SHW (*Schwabiche Hüttenwerke/Aalen*) e prodotta dalla HJS e dalla EMITEC. Essa impiega una struttura metallica costituita da lamine di metallo sinterizzato alternate a un lamierino di acciaio corrugato. Su quest'ultimo sono presenti setti deviatori in grado di forzare il flusso gassoso ad attraversare le lamine di metallo sinterizzato che trattengono le particelle carboniose. Le particelle temporaneamente intrappolate sono successivamente ossidate tramite biossido di azoto (Fig. 3). A differenza dei sistemi di filtrazione convenzionali, questa tecnologia presenta il vantaggio che non può ostruirsi per effetto di un accumulo eccessivo di fuliggine sulla sua superficie, poiché il dispositivo è una struttura parzialmente aperta. Filtri basati sulla tecnologia a flusso parzialmente libero possono ridurre l'emissione del particolato dal 30 al 75 %.

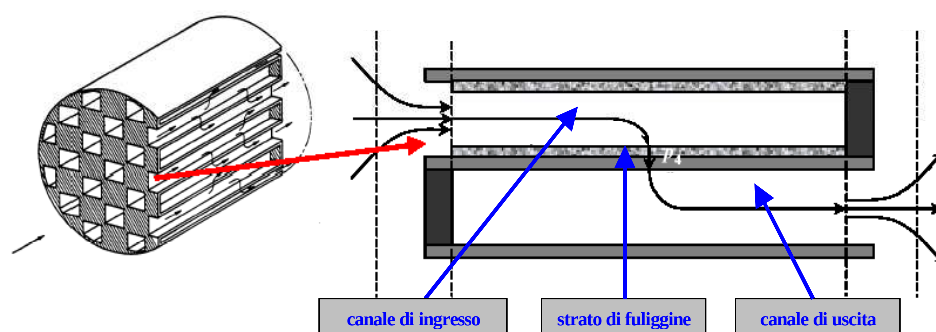


Fig. 1 – Struttura tipica di un filtro ceramico a nido d'ape (*Wall-Flow Particulate Filter*) e suo principio di funzionamento



Fig. 2 – Struttura di una cartuccia filtrante in fibra di ceramica (3M)

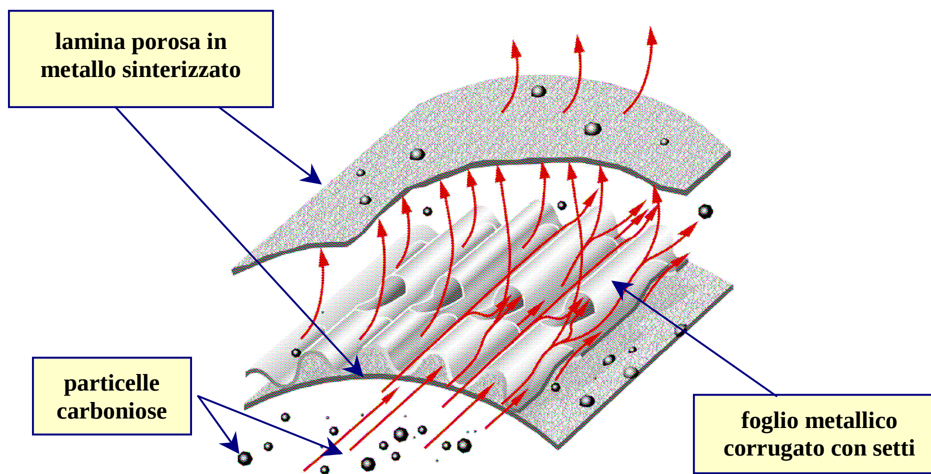
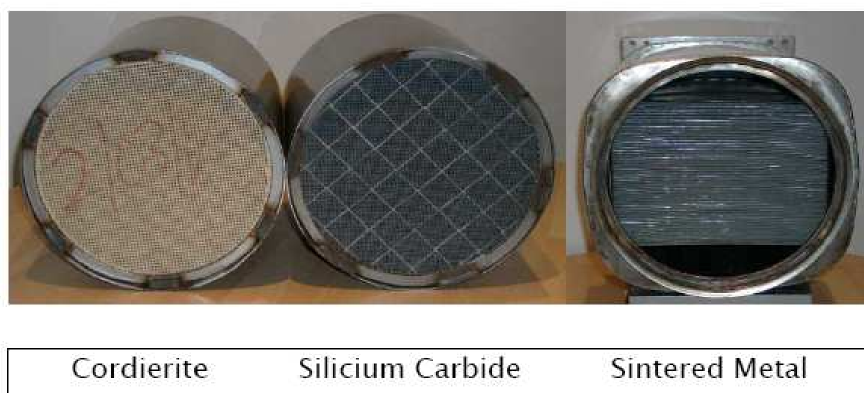


Fig. 3 – Struttura di un filtro in materiale metallico sinterizzato (*Flow-Through Diesel Filter*) e suo principio di funzionamento

I sistemi a flusso parzialmente libero, come quelli convenzionali, possono impiegare anche substrati contenenti un catalizzatore ossidante distribuito sulla superficie del substrato di filtrazione e/o catalizzatori sotto forma di additivi aggiunti nel combustibile per facilitare l'ossidazione del particolato.
La scelta dei materiali con cui costruire il supporto (substrato) è dettata dalla necessità di avere strutture altamente resistenti nel tempo ai fenomeni chimici e fisici (salti improvvisi di temperatura, combustione della fuliggine, assorbimento e desorbimento delle numerose sostanze presenti nella frazione organica del particolato, caratteristiche chimiche delle ceneri e di altri materiali inorganici che si accumulano sulla sua superficie).
In figura 4 sono rappresentati i tre tipi più comuni di substrato di filtrazione impiegati nella produzione dei filtri antiparticolato da applicare sugli autoveicoli.



Cordierite	Silicium Carbide	Sintered Metal

Fig. 4 – Tipologie più comuni di substrato impiegate nella produzione commerciale di filtri antiparticolato

Nel corso dell'esercizio dell'autoveicolo le particelle trattenute dalla trappola filtro si accumulano progressivamente sulla superficie del filtro, determinando un aumento della contropressione allo scarico che, nel tempo, può raggiungere un valore elevato tale da compromettere il funzionamento normale del propulsore. Tale condizione non deve essere raggiunta, per cui si rende necessario rigenerare ciclicamente il corpo filtrante.
La rigenerazione, quindi, diventa l'operazione più importante per ripristinare la capacità di filtrazione del dispositivo e deve svolgersi in modo automatico, basandosi sul controllo di parametri facilmente misurabili (contropressione allo scarico).
Lo spessore della coltre di fuliggine accumulata è un parametro che influenza sensibilmente il processo di rigenerazione poiché controlla la velocità di autocombustione. Infatti, se la carica di particolato raccolto sul filtro è troppo elevata i ripetuti *shock* termici determinati dalla rapida autocombustione della fuliggine depositata durante la rigenerazione possono provocare nel tempo un più rapido deterioramento del corpo filtrante, a causa di fenomeni di sgretolamento e/o di parziale fusione locale del materiale con cui è costruito il monolito. La dimensione dello spessore e la densità di impaccamento della fuliggine accumulata sul corpo filtrante dipende dal meccanismo di deposizione delle particelle presenti nei gas di scarico.
In generale il processo di filtrazione è caratterizzato da due meccanismi differenti che prevalgono l'uno rispetto all'altro in dipendenza delle dimensioni medie delle particelle presenti nei gas di scarico:

- **diffusione normale** e **turbolenta** associata a meccanismi secondari (termoforesi, elettricità statica) per particelle con dimensioni medie < 0,02 μm
- **intercettazione** e **impatto inerziale** per le particelle di dimensioni medie maggiori (impatto convettivo).

Entrambi i meccanismi, illustrati schematicamente nella figura 5, sono comuni alle due tipologie di sistemi filtranti proposti sul mercato (*Wall-Flow e Flow-Through Diesel Filters*).

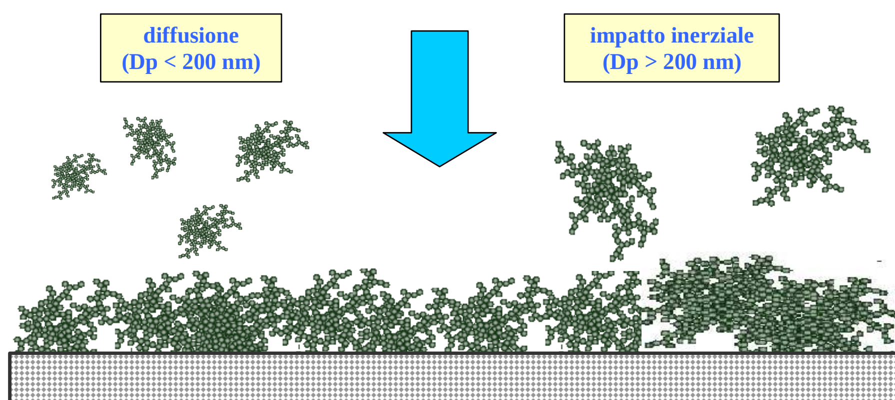


Fig. 5 – Meccanismo di filtrazione del particolato emesso dai motori diesel

Il primo meccanismo è caratterizzato da una deposizione limitata delle particelle carboniose sulla superficie del filtro, mentre col secondo la deposizione ha un'azione più energica. Nella deposizione a diffusione, a parità di massa di fuliggine depositata, la coltre presenta uno spessore maggiore e, di conseguenza, una densità minore rispetto allo stato generato col meccanismo convettivo (Fig. 6). Con l'incremento della densità

dell'impaccamento del particolato diminuisce la penetrabilità della coltre di fuliggine e aumentano le perdite di carico (aumento della contropressione alla scarico) attraverso la superficie del filtro.
La presenza di pori molto sottili e lunghi nel substrato determina un flusso laminare dei gas di scarico attraverso essi (numero di Reynolds < 1) cosicché le perdite di pressione (perdita di carico) seguono la legge di Darcy (proporzionalità diretta con la velocità di flusso e la viscosità dinamica, e inversa col diametro dei pori).
Nei filtri costituiti da un monolito di materiale ceramico o di metallo sinterizzato le perdite di pressione crescono inizialmente in modo più che proporzionale con l'accumulo di fuliggine, passando gradualmente verso uno stato di proporzionalità e poi incrementando rapidamente di nuovo fino al blocco completo del flusso (Fig. 7).

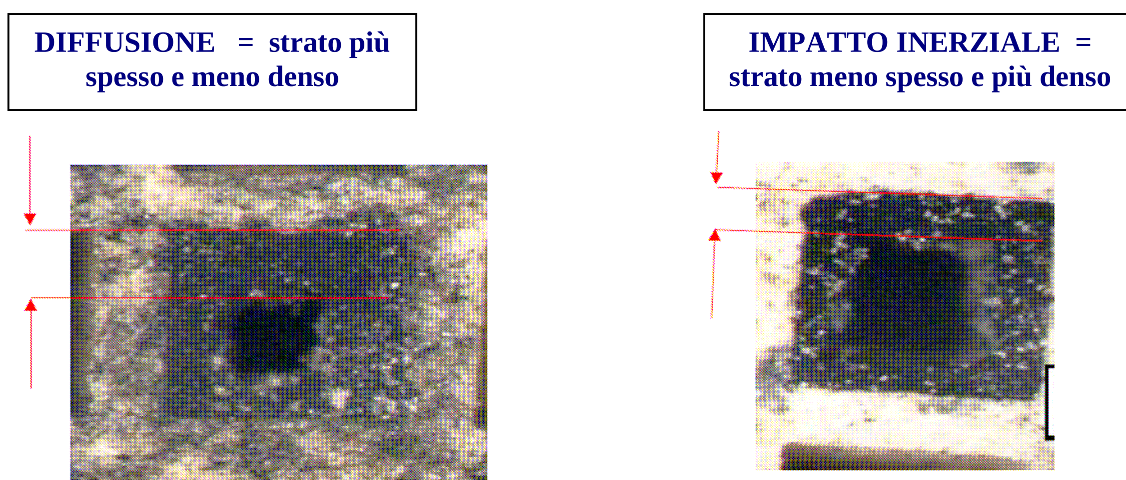


Fig. 6 – Effetto del tipo di meccanismo di filtrazione del particolato sulle caratteristiche dello strato di fuliggine sul filtro (nelle foto è visibile una sezione ingrandita di un canale del substrato di filtrazione)

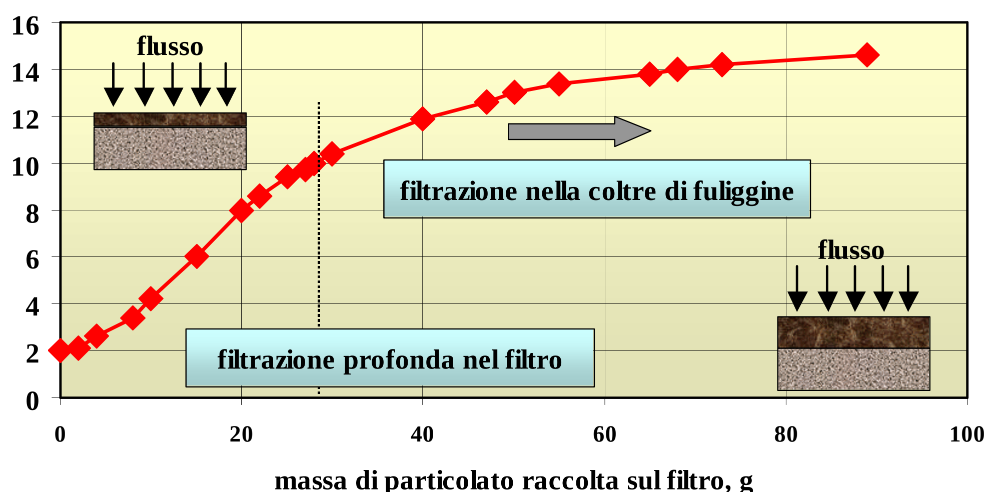


Fig. 7 – Dinamica della deposizione del particolato sulla superficie del filtro

Nei filtri in fibra di ceramica il fenomeno inizialmente è lo stesso, ma col crescere del carico di fuliggine il filtro non si blocca mai, e il grado di separazione del particolato diminuisce sensibilmente.
L'effetto di un aumento delle perdite di carico determinato dall'accumulo progressivo del particolato sul filtro è quello di un incremento proporzionale del consumo di combustibile. Questo è ritenuto trascurabile sino a quando la contropressione alla scarico si mantiene al di sotto di 0,2 bar. Viceversa, condizioni di contropressione superiori a 0,5 bar sono assolutamente da evitare perché la scarsa espulsione dei gas di scarico influisce negativamente sul processo di combustione e, quindi, sul funzionamento regolare del motore.

2.2 Processi di rigenerazione

La produzione su scala industriale di filtri antiparticolato altamente efficienti non ha costituito un problema difficile da risolvere, anche se nel corso degli anni la ricerca di materiali e strutture geometriche più avanzati con cui realizzare i substrati è stata oggetto di lunghi e approfonditi studi per aumentarne la resistenza meccanica e termica, ridurne le perdite di carico, migliorare il flusso radiale degli agenti ossidanti durante il processo di rigenerazione e massimizzarne l'efficienza.
Viceversa, lo sviluppo di tecniche di rigenerazione del filtro ha costituito il principale ostacolo alla realizzazione di dispositivi efficienti nel tempo da applicare come retrofit agli autoveicoli. Diverse tecniche di rigenerazione sono state ideate e sottoposte a ripetute indagini sperimentali per valutarne la funzionalità, come si deduce dalla cospicua letteratura tecnica sul tema.
In linea generale il processo di rigenerazione consiste nella combustione (ossidazione) della coltre di fuliggine che si è formata sulla superficie del substrato in seguito un periodo di funzionamento dell'autoveicolo. L'autocombustione della fuliggine richiede che la temperatura localmente raggiunga il valore minimo di circa 550 - 600 °C, misurato attraverso l'analisi TGA del particolato diesel, e che la concentrazione di ossigeno residuo nei gas di scarico non sia inferiore a 5 %. La temperatura dei gas di scarico sulla trappola generalmente non arriva a valori così elevati ma solo per brevi periodi di tempo. Per questo motivo occorre installare assieme al filtro sistemi ausiliari per favorire la rigenerazione.
Il controllo dell'ispessimento della coltre di fuliggine viene effettuato attraverso il rilievo in continuo della contropressione allo scarico con opportuni sensori di pressione, il cui segnale viene elaborato da una centralina elettronica (ECU). Quando la contropressione raggiunge un livello non più compatibile col funzionamento normale del motore, la centralina di controllo interviene attivando in modo automatico i dispositivi necessari per avviare il processo di rigenerazione del sistema di filtrazione.
Il valore di soglia della contropressione deve essere selezionato con cura per garantire che lo spessore dello strato di fuliggine accumulata sia equilibrato: uno spessore troppo basso porta a una frequenza elevata del processo di rigenerazione, mentre un accumulo eccessivo di particolato sul filtro porta inequivocabilmente a un rapido deterioramento del substrato per effetto di un eccessivo e repentino rialzo locale della temperatura determinato dall'autocombustione veloce dello strato di fuliggine.
Generalmente una trappola per il particolato deve essere in grado di autorigenerarsi in quasi tutte le condizioni di funzionamento del motore (carico/velocità), le quali influenzano la temperatura dei gas di scarico. Questa non deve essere mai inferiore a 250 °C.

La rigenerazione di un filtro può essere facilitata abbassando la temperatura di autoaccensione della fuliggine accumulata sulla sua superficie tramite un opportuno catalizzatore e/o innalzando per un breve periodo di tempo la temperatura dei gas di scarico attraverso la gestione pilotata della regolazione degli organi del motore che intervengono sul processo di combustione. L'innalzamento della temperatura dei gas di scarico richiesto deve essere sufficiente per innescare la reazione di autocombustione della coltre di fuliggine accumulata sul filtro, evitando variazioni del comportamento dell'autoveicolo avvertibili dal conducente durante la guida.
La rigenerazione di un filtro può essere "**attiva**" o "**passiva**". La rigenerazione è "attiva" quando è avviata tramite un sistema di controllo "*on-line*" della contropressione allo scarico che al momento opportuno avvia i sistemi che forniscono energia (bruciatori, riscaldatori elettrici) o modifica i parametri di iniezione del combustibile con o senza l'ausilio di sostanze ad azione ossidante e/o di catalizzatori. Quella "passiva" agisce direttamente sulla combustione spontanea della fuliggine attraverso l'uso di catalizzatori ossidanti.
Nel corso degli anni sono state sviluppate molte tecniche di rigenerazione dei filtri, alcune delle quali combinate per ottenere una maggiore efficacia. Le principali sono brevemente descritte di seguito.

- Rigenerazione catalitica basata su un catalizzatore costituito da metalli nobili e non (Ce, Fe, Pt) applicato sulla superficie del filtro, in grado di abbassare di alcune decine di gradi la temperatura di autoaccensione della fuliggine necessaria per la sua combustione.

- Rigenerazione catalitica basata su un catalizzatore ossidante posto a monte del filtro. Con questa tecnica, tipica del sistema noto comunemente come CRT® (sviluppato da Johnson & Matthey), si impiega il biossido di azoto come agente comburente per l'ossidazione della fuliggine in sostituzione dell'ossigeno residuo presente nei gas di scarico. Infatti, la reazione di ossidazione con questo ossidante è caratterizzata da una temperatura di attivazione più bassa di quella di combustione con l'ossigeno (Fig. 8). La rigenerazione diventa così un processo continuo. I sistemi basati su questa tecnica si prestano a essere impiegati nei motori HD sia in fase di progetto dell'autoveicolo che come *retrofit* sui motori di autoveicoli esistenti.

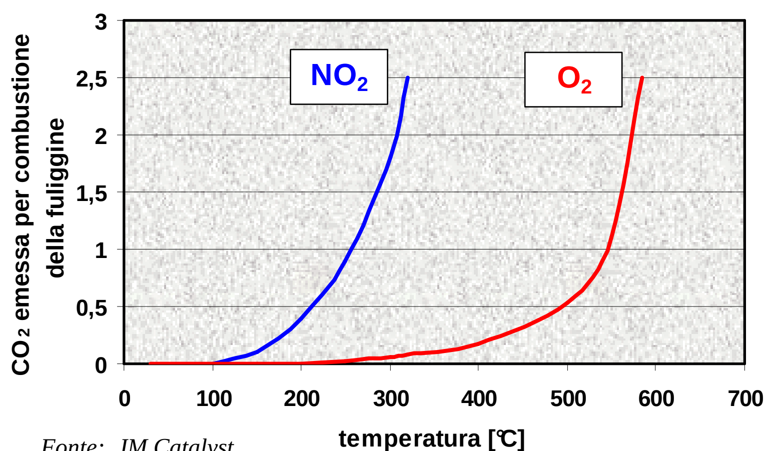


Fig. 8 – Temperature di ossidazione del particolato con l'ossigeno e con il biossido di azoto

La quantità di biossido di azoto presente nei gas di scarico normalmente è insufficiente per avviare il processo di ossidazione, per cui è necessario anteporre al sistema di filtrazione un catalizzatore ossidante, a base di platino, in modo da convertire significative quantità di monossido di azoto in biossido. Per ottenere una buona efficienza di rigenerazione il rapporto “emissione ossidi di azoto / emissione di particolato” deve risultare non inferiore a 20, valore ben più elevato di quello stechiometrico che è pari a 8.
L’eccedenza di biossido di azoto non reagito (più tossico del monossido di azoto) determina un incremento sensibile del rapporto biossido di azoto / monossido di azoto nei gas di scarico espulsi nell’atmosfera. L’impatto sull’ambiente derivato da una maggiore emissione di biossido di azoto è un aspetto ritenuto non trascurabile ed è oggetto di studio per comprenderne la rilevanza.

- Rigenerazione catalitica con catalizzatore *fuel-borne (FBC)*, disperso in modo omogeneo nel combustibile (gasolio). Questa tecnica, impiegata sia con sistemi di rigenerazione attiva che passiva, viene già applicata nella produzione in serie di alcuni modelli europei di autovettura, ma si può adattare anche per sistemi di riduzione da impiegare come *retrofit*. La presenza del catalizzatore a base metallica nel combustibile presenta lo svantaggio di contribuire all’accumulo di ceneri inorganiche sul filtro nel corso dell’esercizio dell’autoveicolo. La fase attiva del catalizzatore *fuel-borne* è costituita da composti organometallici di cerio (es.: Eolys prodotto da Rodia), di ferro (es.: con i marchi satacen e Octimax® prodotti dalla Octel e F7990/F7991 da Infineum) e da una combinazione degli stessi (es.: Ce/Fe prodotto da Rodia col marchio Eolys 2 e Ce/Pt prodotto da CDT col marchio DFX-DPF).

- Rigenerazione per solo incremento della temperatura dei gas di combustione ottenuta temporaneamente regolando in modo opportuno il flusso di aria aspirata dal motore attraverso una valvola a farfalla, e/o l’attuazione periodica di post-iniezioni multiple.

- Rigenerazione attraverso l’incremento momentaneo della temperatura dei gas di scarico tramite un bruciatore di gasolio attivato quando la contropressione allo scarico ha raggiunto un valore di soglia. Il bruciatore viene attivato per circa dieci minuti sufficienti a completare il processo di rigenerazione. Questo sistema, generalmente complesso, presenta il rischio di causare forti *shock* termici sul materiale con cui è costruito il substrato per effetto di un rapido innalzamento della temperatura locale a valori superiori a 700 °C.

- Rigenerazione attraverso il riscaldamento temporaneo dei gas di scarico con un sistema a resistenza elettrica. In questo caso la combustione della fuliggine è assicurata da una temperatura locale sufficientemente elevata, anche quando l’autoveicolo viaggia a velocità molto basse, tipiche della circolazione in ambiente urbano. E’ possibile ridurre l’energia elettrica richiesta per mezzo dell’ausilio di additivi *fuel-borne* o di un rivestimento catalitico del substrato.

Le due ultime tecniche descritte rappresentano processi di rigenerazione periodica controllati dalla centralina elettronica quando la contropressione allo scarico raggiunge il valore di soglia.

Il processo di rigenerazione dura generalmente qualche minuto, mentre l'intervallo medio tra due rigenerazioni successive varia da circa 500 a 700 km di percorrenza, in dipendenza dello stile di guida dell'utente, del tipo di percorso effettuato e del livello di emissione di particolato dell'autoveicolo.
L'impiego di opportuni catalizzatori con proprietà ossidanti, come i composti del cerio, del ferro e del platino, determinano un abbassamento della temperatura di autocombustione del particolato di un centinaio di gradi per favorire il processo di rigenerazione anche nelle condizioni di esercizio più difficili. La dispersione di piccole quantità di queste sostanze nel combustibile (catalizzatore *fuel-borne*) risulta il modo più efficace per esplicare l'azione catalitica dell'additivo, poiché assicura un gran numero di punti di contatto tra le nanoparticelle cristalline del metallo attivo e quelle carboniose dello strato di fuliggine depositata sul filtro.
Altri accorgimenti per facilitare il raggiungimento della temperatura di autocombustione dello strato di fuliggine raccolta sul filtro sono l'isolamento termico del corpo filtrante, la posizione più ravvicinata al collettore di scarico del motore, la formulazione del catalizzatore ossidante (es. la sostituzione del platino col sistema platino/palladio) e il materiale del supporto filtrante.
Con l'avvicinamento del sistema di filtrazione al collettore di scarico l'incremento di consumo di combustibile necessario per arricchire la miscela combustibile/aria nel motore e, quindi, l'aumento della temperatura dei gas di scarico al valore richiesto per avviare la rigenerazione del filtro tendono a diminuire, poiché il sistema è intrinsecamente più caldo.
La figura 9 schematizza l'andamento della temperatura dei gas di scarico durante un processo di rigenerazione di un filtro in cui si impiega un catalizzatore *fuel-borne* associato con la tecnica delle post-iniezioni multiple.

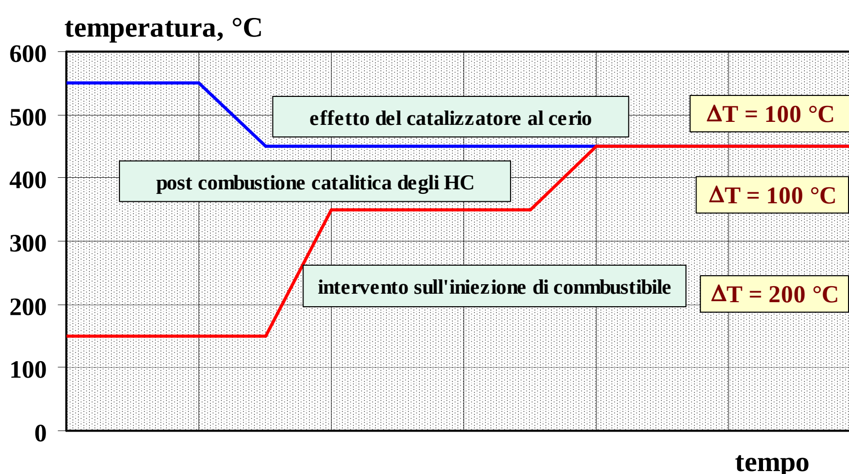


Fig. 9 – Principio di autorigenerazione del filtro di tipo catalitico che impiega composti al cerio dispersi nel combustibile

Per caratterizzare il processo di rigenerazione occorre distinguere generalmente due parametri: la **temperatura di *light-off*** che indica l'inizio della combustione dello strato di fuliggine e la **temperatura di equilibrio** (***Balance Point Temperature – BPT***), il cui valore è più elevato.

Quando i gas di scarico raggiungono la temperatura di *light-off* la reazione di ossidazione della coltre di fuliggine è relativamente lenta. In tali condizioni la velocità di crescita della coltre di fuliggine sulla superficie del filtro è superiore a quella di scomparsa per effetto della combustione ed è, quindi, insufficiente per ripristinare la funzionalità del dispositivo antiparticolato. Pertanto è necessario raggiungere almeno il valore della temperatura di equilibrio (BPT), ossia quella alla quale la velocità di crescita dello strato di fuliggine è uguale a quella con la quale scompare per ossidazione (combustione) nella fase di rigenerazione della trappola. Nella realtà la temperatura dei gas di scarico deve essere di alcuni gradi superiore a quella di equilibrio per portare a completamento il processo di rigenerazione in tempi relativamente brevi.
Nella tabella 1 vengono presentati i valori delle tre temperature che caratterizzano alcuni dei processi di rigenerazione dei filtri antiparticolato.

Tabella 1
Temperature caratteristiche dei sistemi a rigenerazione passiva

sistema di rigenerazione	**Temperatura (°C)**		
	light-off	**di equilibrio**	**completa rigenerazione**
CRT (J&M)	230	350	> 375
CSF (Engelhard)	260	385	> 425
Rivestimento catalitico (Buck)	360	420	> 450
Additivo al Ce (Rodia)	350	400	> 425
Additivo al Fe (Octel)	330	380	> 400
Additivo al Ce/Pt (CDT)	300	350	> 375

L'incremento di emissione dell'ossido di carbonio e degli idrocarburi incombusti durante la rigenerazione di un filtro è generalmente trascurabile, poiché il livello di concentrazione nei gas di scarico è dello stesso ordine di grandezza di quello delle emissioni del motore nella sua versione originale, ossia senza filtro. Inoltre il processo di rigenerazione è temporaneo e di breve durata.
L'installazione di filtri antiparticolato determina un lieve aumento (circa 1 %) di consumo di combustibile causato dall'incremento della contropressione allo scarico e dalla necessità di attivare iniezioni aggiuntive di combustibile nel motore per i sistemi a rigenerazione periodica. Molti sistemi di filtrazione, comunque, sono stati ottimizzati per minimizzare, fino ad annullare, questa penalità.

2.3 Efficienza di abbattimento dell'emissione di particolato

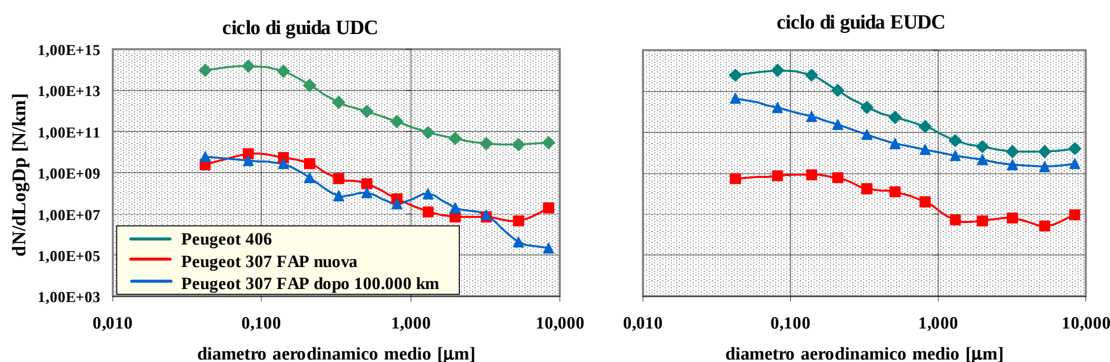
L'**efficienza *Eff*** di un sistema di filtrazione viene definita come rapporto percentuale della massa o del numero di particelle emesse misurata in uscita dal filtro (PM_{out}) e gli stessi parametri misurati ingresso (PM_{in}):

$$\boldsymbol{Eff} = [(PM_{in} - PM_{out}) / PM_{in}] \times 100$$

La **penetrazione** ***Pe***, invece, è un parametro per caratterizzare l'efficienza delle trappole nel trattenere la frazione più fine del particolato ed è definita come:

$$Pe = 1 - Eff$$

La penetrazione indica il rapporto tra l'ammontare delle particelle che lasciano la trappola e quello delle particelle che entrano nella trappola. Tanto più basso è il valore di questo parametro, tanto più il filtro è efficace a trattenere la particelle.
Numerose indagini sperimentali hanno messo in evidenza come l'efficienza di riduzione dell'emissione del particolato di un filtro è molto elevata in tutto lo spettro dimensionale misurabile: in media il numero di particelle emesse da un'autovettura si riduce di circa 10^3 - 10^4 volte rispetto a quello di un'autovettura Euro 3 non dotata di filtro (Fig. 10). Anche particelle con diametro aerodinamico inferiore a 50 nm (particolato ultrafine) vengono trattenute dal filtro, come è stato evidenziato in molti lavori sperimentali.



Fonte: SSC

Fig. 10 – Distribuzione dimensionale del particolato emesso da un'autovettura dotata di filtro antiparticolato a confronto con quella del particolato emesso da un'autovettura convenzionale nuova e dopo 100.000 km di percorrenza

Tuttavia, misure effettuate in alcune sperimentazioni per determinare la distribuzione dimensionale del particolato all'uscita da sistemi di filtrazione che impiegano additivi catalitici nel combustibile (*fuel-borne catalyst*) hanno indicato un incremento di emissione della frazione più fine. In tali casi la distribuzione dimensionale del particolato emesso presenta un tipico andamento bimodale, come indicato nella figura 11, piuttosto che unimodale. L'effetto è causato dalla nucleazione di nanoparticelle dovuta alla presenza nei gas di scarico di particelle ultrafini di ossidi del metallo che si formano nella combustione dell'additivo. L'effetto risulta tanto più pronunciato quanto maggiore è la concentrazione di additivo nel combustibile.
Lo stesso fenomeno è causato anche dalla presenza di zolfo nel gasolio: l'efficienza di trattenimento delle particelle in modo nucleazione (Dp < 50 nm) diminuisce man mano che il tenore di zolfo aumenta. L'effetto si manifesta in maniera più evidente quando il sistema di filtrazione è associato a un catalizzatore ossidante, come nel sistema CRT®, poiché questo favorisce sensibilmente la conversione del biossido di zolfo a anidride solforica e, quindi, la formazione di solfati. Questo effetto non si manifesta a bassi carichi del motore e quando il combustibile che alimenta il propulsore è un gasolio desolforato.
Un terzo effetto osservato in alcune indagini sperimentali riguarda il probabile rilascio (non ancora accertato), nei gas di scarico all'uscita dal filtro, di particelle ultrafini (10 – 30 nm) costituite dalle ceneri accumulate sulla sua superficie dopo un periodo di fun-

zionamento a lungo termine degli autoveicoli in servizio. Questa deduzione è derivata dal fatto di aver constatato che la massa di ceneri raccolta sul filtro e il contenuto di metalli in esse non si bilanciano con quelle determinate dalla misura del consumo di olio lubrificante del motore.

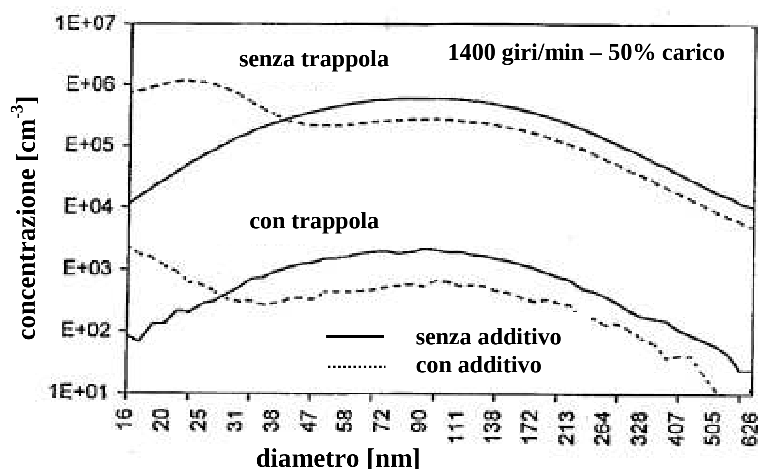


Fig. 11 – Effetto dell’aggiunta di additivo a base metallica (Eloys 100 ppm di Ce) nel combustibile sulla distribuzione dimensionale del particolato

3. PROBLEMATICHE NELL'IMPIEGO DEI FILTRI ANTIPARTICOLATO

3.1 Effetto del tenore di zolfo del combustibile

La presenza di zolfo nel gasolio non determina fenomeni di avvelenamento del filtro, ma si osserva generalmente una perdita di efficienza accelerata a causa dell'accumulo di solfati che tendono a occludere i pori del corpo filtrante. L'effetto è quello di un aumento più rapido della contropressione allo scarico e, quindi, della frequenza di rigenerazione. Esso si manifesta maggiormente quando è presente un convertitore catalitico ossidante a monte del filtro e determina, come conseguenza negativa, anche un aumento del consumo di combustibile.
Un filtro antiparticolato è in grado di trattenere in modo efficace le particelle carboniose generate dalla combustione nel motore, anche quelle più fini, ma non è in grado di bloccare l'anidride solforica libera che si forma per la presenza di un catalizzatore ossidante posto a monte del dispositivo filtrante o disperso nel combustibile. L'anidride solforica è considerata uno dei precursori della formazione di particolato secondario nell'atmosfera per effetto di processi di condensazione e di formazione di solfato di ammonio. L'effetto è stato riscontrato con gasoli aventi tenore di zolfo superiore a 50 mg/kg (Fig. 12).

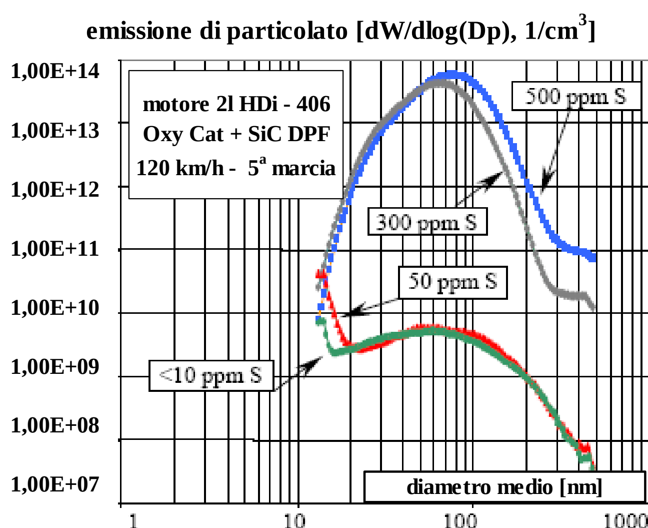


Fig. 12 – Effetto del tenore di zolfo nel gasolio sul livello di emissione del particolato fine di un'autovettura con motore HDi dotata di catalizzatore ossidante e DPF al SiC

Per i sistemi di filtrazione a rigenerazione continua dotati di catalizzatore ossidante a monte del corpo filtrante la presenza di zolfo nel gasolio determina col tempo due importanti effetti negativi sul funzionamento del sistema di filtrazione: la diminuzione dell'efficienza di conversione del monossido di azoto a biossido, penalizzando la rigenerazione completa del filtro, e l'aumento sensibile della temperatura dei gas di scarico richiesta dal dispositivo per autorigenerarsi.
La perdita di efficienza del filtro è sensibile alla presenza di un tenore di zolfo relativamente elevato nel combustibile per la competizione della reazione di ossidazione del

biossido di zolfo ad anidride solforica con quella di conversione del monossido di azoto a biossido di azoto. Questo effetto è stato messo in evidenza con prove di laboratorio condotte da Johnson & Matthey e da IVECO (Fig. 13).
Un'altra potenziale conseguenza negativa determinata dalla perdita di efficienza del filtro per effetto della presenza dello zolfo nel combustibile è la combustione incontrollata della massa di particolato che tende ad accumularsi sul filtro, provocando un danno irreversibile al materiale che lo costituisce per eccessivo surriscaldamento.

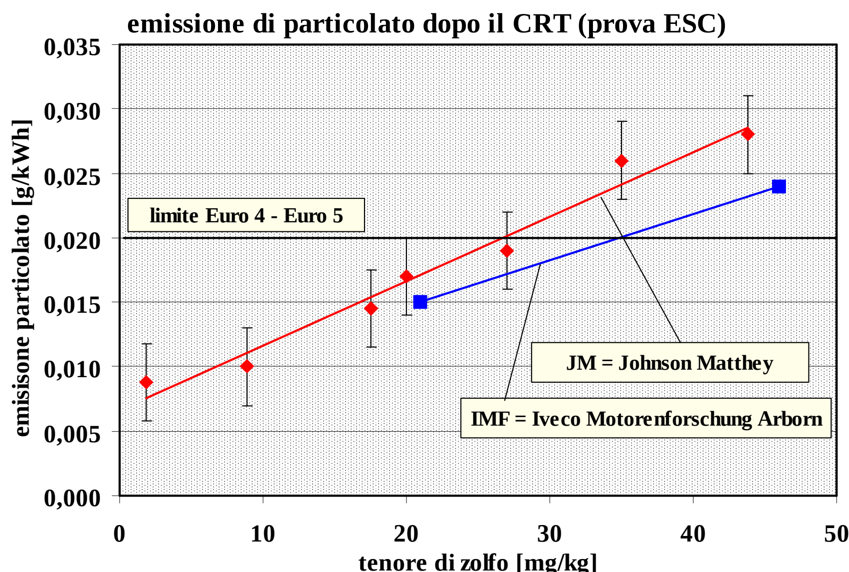


Fig. 13 – Effetto del tenore di zolfo nel combustibile sull'emissione del particolato dopo il filtro catalitico di tipo CRT® (dati JM e IVECO)

Per tutte le tipologie di sistemi di filtrazione la presenza di zolfo nel combustibile è causa di un accumulo progressivamente costante di solfati (ceneri) sulla superficie del corpo filtrante. Questo determina il graduale intasamento dei pori e, come conseguenza, un incremento rapido della contropressione allo scarico. L'effetto è maggiormente sentito se il dispositivo filtrante è accoppiato con un catalizzatore ossidante.
Anche la temperatura richiesta per la rigenerazione continua di un sistema di filtrazione è influenzata da tenori elevati di zolfo nel combustibile. Infatti, la temperatura di equilibrio (BPT) del sistema di filtrazione aumenta con l'incremento della concentrazione di zolfo nel combustibile. Dati riportati da Volkswagen hanno indicato un incremento del BPT di circa 40 °C, quando il motore era alimentato con un gasolio contenente 350 mg/kg in sostituzione di un gasolio a bassissimo tenore di zolfo (< 10 mg/kg), come conseguenza della minore efficienza di conversione del monossido di azoto a biossido (Fig. 14).
La perdita di efficienza del sistema di filtrazione è maggiormente critica nelle condizioni di esercizio a basso carico del motore, quando la temperatura dei gas di scarico si mantiene a valori non superiori a 200 °C. In queste condizioni il consumo di combustibile tenderà ad aumentare per raggiungere temperature di autorigenerazione più elevate. I risultati di prove svolte dalla Volkswagen hanno indicato una penalizzazione del con-

sumo di combustibile di circa il 2% quando il gasolio a bassissimo tenore di zolfo veniva sostituito con un gasolio contenente 50 mg/kg di zolfo.

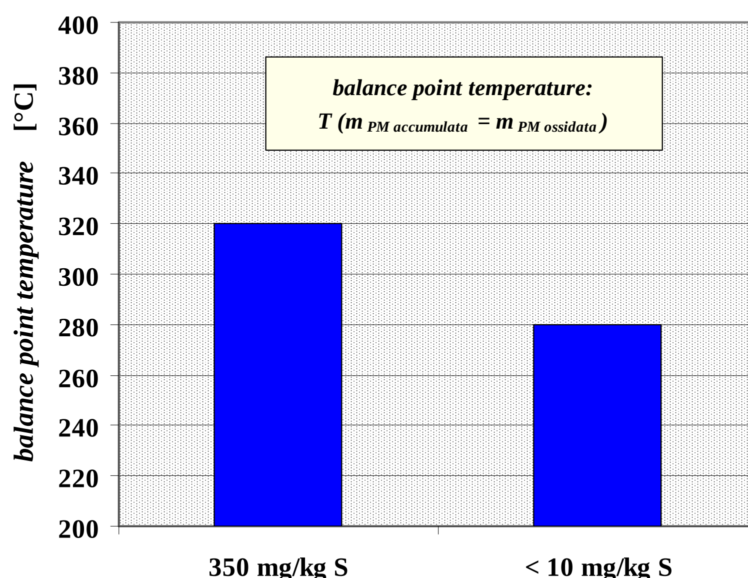
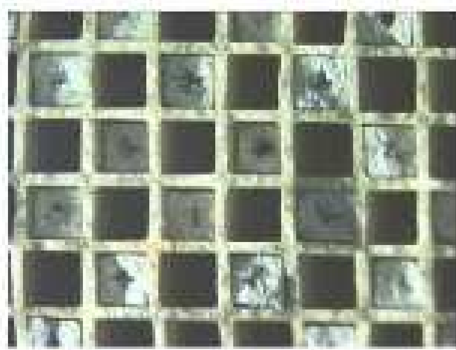


Fig. 14 – Effetto del tenore di zolfo nel gasolio sull'efficienza (BPT) di abbattimento del particolato di un filtro catalitico a rigenerazione continua (dati IVECO)

3.2 Accumulo delle ceneri

Col termine di ceneri si intende tutti quei materiali di natura inorganica (generalmente ossidi o solfati) che si producono per ossidazione di composti (naturali o aggiunti) contenenti metalli durante la combustione nel motore. I materiali inorganici, dispersi generalmente nel particolato, tendono ad accumularsi sulla superficie del filtro e non sono rimossi durante la rigenerazione perché non si trasformano in sostanze gassose.
Tre sono le sorgenti delle ceneri che si accumulano sul filtro.
Una fonte primaria di ceneri è costituita da additivi a base di metalli come il magnesio, calcio, zinco e fosforo introdotti nell'olio lubrificante per migliorarne le caratteristiche prestazionali. Poiché l'olio lubrificante partecipa, anche se in minima parte, alla combustione nel motore, le ceneri prodotte tendono ad aggregarsi sul particolato emesso.
Una seconda sorgente di ceneri è costituita da microparticelle metalliche prodotte dall'usura o dalla corrosione degli elementi costruttivi del motore. Queste ceneri sono costituite da ossidi o sali di ferro, cromo, nichel, alluminio, rame e zinco.
Una terza fonte di ceneri è costituita dagli additivi a base di cerio, ferro o platino aggiunti al combustibile per facilitare il processo di autorigenerazione del filtro. Questo problema non esiste per i sistemi di filtrazione che non fanno uso degli additivi *fuel-borne*. Risulta evidente che la quantità di ceneri prodotte è proporzionale alla concentrazione di additivo nel combustibile e che concentrazioni relativamente elevate di additivo favoriscono una più rapida ed efficace rigenerazione del filtro. La tendenza attuale, comunque, è quella di abbassare quanto possibile il dosaggio del componente attivo dell'additivo nel combustibile, senza perdere efficienza di rigenerazione, per ridurre in

modo significativo il contributo del catalizzatore all'accumulo di ceneri sul substrato del sistema di filtrazione. Il miglioramento dell'attività catalitica dei sistemi concepiti più recenetemente consente di diminuire il dosaggio anche a valori inferiori a 10 mg/kg.
In definitiva si può affermare che l'accumulo di ceneri sul sistema di filtrazione dipende dal consumo e dalla qualità dell'olio lubrificante, dal consumo medio del combustibile e dall'ammontare del particolato emesso dal motore.
Consumi di olio elevati, come quelli che si possono manifestare con propulsori di vecchio modello, specialmente se molto "usurati", determinano un accumulo progressivo di ceneri più veloce con la conseguenza di un aumento più rapido della contropressione allo scarico.
Nella figura 15 viene mostrata una fotografia della sezione trasversale di un filtro in materiale ceramico altamente intasato da ceneri e caratterizzato da elevate perdite di carico. Queste ultime determinano a loro volta un aumento del consumo di combustibile e possono causare danni irreparabili al dispositivo antiparticolato. Infatti, la disomogeneità della distribuzione delle temperature locali in un substrato ricoperto di ceneri può determinare elevati stress termici nel materiale con cui è costruito il filtro durante la sua rigenerazione.



Fonte: Aseol

Fig. 15 – Intasamento dei canali di un filtro in materiale ceramico per effetto di un eccessivo accumulo di ceneri

Il consumo di olio lubrificante dipende dalle caratteristiche costruttive del propulsore, dalla severità dell'esercizio dell'autoveicolo e dall'osservanza delle prescrizioni del costruttore sulla frequenza e sulla buona pratica di manutenzione del motore. Autoveicoli che operano generalmente a bassa temperatura e a bassa velocità, come quella di autobus urbani in condizioni di traffico intenso, possono avere maggiori consumi di lubrificante rispetto ad autoveicoli funzionati a velocità e temperature più elevate. Inoltre, motori ben mantenuti possono garantire nel tempo consumi contenuti di olio lubrificante. Sotto questo aspetto si ritiene che il tempo speso in termini di ore di funzionamento dell'autoveicolo, piuttosto che il chilometraggio accumulato, possa costituire un parametro più efficace per valutare l'intervallo di manutenzione del filtro antiparticolato.
Il consumo di olio può essere influenzato negativamente anche dall'uso di additivi *aftermarket* addizionati al lubrificante nuovo durante la sua sostituzione nel motore o dalla cattiva e imprudente pratica di riversare una parte del lubrificante esausto nel combustibile come modo semplice e sbrigativo per il suo smaltimento.
Nell'applicazione di filtri antiparticolato come retrofit il produttore di questi dispositivi può raccomandare all'utilizzatore di "provare" autoveicoli con motori caratterizzati da

elevati consumi di olio come garanzia del buon funzionamento del dispositivo proposto anche nelle condizioni operative peggiori. In questo modo si dà una dimostrazione della validità del prodotto per renderlo un candidato favorito al momento della selezione del sistema di filtrazione da applicare a una flotta di autoveicoli da "convertire".
Tutti i sistemi di filtrazione di qualsiasi tecnologia possono considerarsi serbatoi di ceneri e, pertanto, devono essere periodicamente svuotati (manutenzione del sistema di filtrazione). L'intervallo di "manutenzione" viene stabilito in funzione del valore limite di accettabilità della contropressione allo scarico che dipende dalle caratteristiche geometriche e costruttive del filtro.
Molti miglioramenti sono stati apportati nel corso degli anni alla struttura del substrato per minimizzare gli effetti negativi determinati dall'accumulo delle ceneri. Essi hanno riguardato il tipo di materiale con cui realizzarlo, il grado di porosità, la densità delle celle, lo spessore delle pareti per ridurre le perdite di carico dei gas combusti che le attraversano. La scelta del materiale da costruzione, comunque, rimane condizionata anche dalla necessità di assicurare una buona resistenza meccanica, un'elevata conducibilità termica e una buona resistenza agli stress termici del substrato e del rivestimento che contiene un catalizzatore ossidante (*wash-coat*), se presente.
Generalmente sistemi di filtrazione di grande volume assicurano una maggiore capacità di accumulo delle ceneri prima di raggiungere il valore di accettabilità della contropressione allo scarico, con la conseguenza di una maggiore ampiezza dell'intervallo di manutenzione. L'incremento di volume del sistema di filtrazione deve essere, comunque, compatibile con gli ingombri disponibili a bordo dell'autoveicolo e con la capacità di assicurare un'autorigenerazione completa del filtro stesso.
Soluzioni geometriche del substrato in grado di assicurare una maggiore capacità di accumulo di ceneri a parità di volume del sistema di filtrazione, senza incorrere in incrementi inaccettabili delle contropressione, sono state studiate recentemente. Una di questa impiega canali a sezione ottagonale alternati con canali a sezione quadrata; un'altra è costituita da canali alternati a sezioni quadrate di dimensioni diverse. Queste geometrie innovative sono state già applicate sui sistemi di filtrazione di alcuni modelli di autovettura europei. Con tali sistemi l'intervallo di manutenzione dei filtri può raggiungere anche 200.000 km di percorrenza (praticamente l'intera vita di un'autovettura).
Per evitare un eccessivo accumulo di ceneri, l'intervallo di manutenzione dei filtri applicati come retrofit per gli autoveicoli esistenti, raccomandato dai produttori dei sistemi di filtrazione, è di 100.000 – 150.000 km di percorrenza. L'intervallo di manutenzione effettivo viene scelto tenendo conto, da caso a caso, del consumo di olio del motore e del ciclo di funzionamento dell'autoveicolo durante l'esercizio. L'ampia gamma di valori dell'intervallo di manutenzione riflette la notevole varietà di motori /autoveicoli in circolazione e delle condizioni di esercizio, ed è basata sulle esperienze pluriennali dei produttori dei sistemi di filtrazione.
La fornitura di un sistema di filtrazione da applicarsi come retrofit deve comprendere, oltre all'elemento filtrante, anche un dispositivo in grado di informare l'autista del momento in cui si deve sottoporre a manutenzione il filtro antiparticolato installato sull'autoveicolo. I produttori di filtri, infatti, sono tenuti ad associare al dispositivo antinquinamento una **centralina di controllo diagnostico (OBD)** con un indicatore a bordo dell'autoveicolo per monitorare in continuo la temperatura dei gas di combustione, la contropressione allo scarico e/o le perdite di carico attraverso il filtro. L'indicazione del momento di intervento per la manutenzione del sistema di filtrazione deve essere data con un sufficiente margine di sicurezza per assicurare che non si raggiungano condizio-

ni inaccettabili di funzionamento del motore. Il monitoraggio continuo della contropressione allo scarico per gli autoveicoli è richiesta negli USA dall'EPA e in California dal CARB. In Europa il monitoraggio dei due parametri è previsto dal protocollo VERT come una delle condizioni necessarie affinché un sistema di filtrazione risulti un candidato accettabile per avviare un programma di aggiornamento degli autoveicoli di una flotta da adeguare.

Nel caso specifico di autovetture dotate di filtri antiparticolato di serie in Europa, l'intervallo di manutenzione raccomandato dai Costruttori è passato negli ultimi anni da 80.000 km a 120.000 km di percorrenza. L'ampliamento dell'intervallo di manutenzione è stato determinato dal perfezionamento dei sistemi antiparticolato adottati che richiedono dosaggi di catalizzatore *fuel-borne* molto più bassi rispetto ai primi sistemi applicati fino a qualche anno fa. Allo stato attuale i sistemi antiparticolato più avanzati richiedono un dosaggio di catalizzatore *fuel-borne* inferiore a 10 mg/kg. L'uso di sistemi di filtrazione con geometria ottagonale o costruiti in metallo sinterizzato, associato a un dosaggio di catalizzatore nel combustibile inferiore a 10 mg/kg, può allungare ulteriormente l'intervallo di manutenzione a valori prossimi anche a 260.000 km.

La tecnica per rimuovere le ceneri accumulate sui filtri antiparticolato, sia quelli impiegati come retrofit per gli autoveicoli esistenti che quelli adottati sugli autoveicoli prodotti in serie, consiste nell'insufflare aria compresa (50-100 psi) in direzione contraria al normale flusso dei gas di scarico. Per i sistemi rivestiti con *wash-coat* catalitico viene raccomandata la pulizia in un ambiente sottovuoto spinto, piuttosto che in pressione, per evitare di danneggiare il corpo filtrante. L'avvenuta pulizia del sistema di filtrazione al termine del processo, che dura mediamente da 30 a 50 minuti, deve essere confermata attraverso il controllo visivo dei canali del corpo filtrante e la misura delle caratteristiche di flusso. Ulteriori interventi di manutenzione comprendono anche la rimozione di particelle carboniose residue attraverso il trattamento del corpo filtrante in un forno a elevata temperatura (450 – 800 °C) per alcune ore. Questo processo deve essere controllato attentamente per minimizzare gli stress termici durante il riscaldamento e il raffreddamento del substrato nelle fasi iniziale e finale del trattamento. Per rendere più spedito e più affidabile il processo di manutenzione dei filtri antiparticolato alcuni produttori adottano stazioni di servizio automatizzate in grado di svolgere le operazioni di pulizia su più filtri contemporaneamente.

In Europa i principali produttori di sistemi di filtrazione e i fornitori di condotti di scarico dotati di filtri antiparticolato, in accordo con le Case automobilistiche, hanno sviluppato un protocollo per la manutenzione dei filtri adottati per la produzione in serie di autovetture. Questo prevede l'ispezione visiva del corpo filtrante, la rigenerazione del filtro tramite insufflazione di aria calda, la pesata del filtro rigenerato e il lavaggio con acqua calda con un detergente alternato con flussi pulsati di aria per rimuovere ceneri particolarmente persistenti, essiccazione con aria calda, ripesata del corpo filtrante, ispezione visiva con e senza l'ausilio di un endoscopio e misura delle perdite di carico con aria. Questo processo di pulizia è certificato ISO 14001.

3.3 Adattabilità dei filtri antiparticolato

Nonostante la complessità delle problematiche inerenti all'impiego di filtri antiparticolato come retrofit per flotte di autoveicoli diesel pesanti (autobus, TIR, ecc.) e l'ampia disponibilità sul mercato di dispositivi di varia concezione più o meno efficaci, proposti negli ultimi anni sul mercato, non si dispone ancora, a livello europeo, di un adeguato strumento standard di valutazione di questi.

La loro affidabilità nel tempo, infatti, è la chiave del successo di un particolare intervento richiesto dalle autorità governative locali, per es. sul trasporto pubblico, per la salvaguardia dell'ambiente. L'esigenza di avvalersi della garanzia di un'elevata affidabilità delle proposte commerciali si manifesta anche in virtù dell'onerosità delle scelte a cui è chiamato il decisore per far fronte alle emergenze di natura ambientale.
Nel corso degli ultimi dieci anni sono state intraprese iniziative, inizialmente su base locale e successivamente su base nazionale, per definire criteri e procedure tecniche sperimentali per valutare i dispositivi antiparticolato che di volta in volta apparivano sul mercato. Progetti di valutazione e di certificazione di filtri antiparticolato sono stati realizzati negli USA (CARB in California e EPA negli altri stati), in Giappone e in Europa da parte organi governativi della Svizzera e della Germania.
In questo documento verrà illustrato brevemente soltanto il progetto svizzero/tedesco, perché ritenuto quello più rispondente alla realtà europea.
Alla fine degli anni novanta le Agenzie per l'Ambiente svizzera (BUWAL - *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft*) e tedesca (UBA - *Deutsches Umweltbundesampt*) in cooperazione con le agenzie svizzera, austriaca e tedesca sulla salute nel lavoro, i costruttori di motori/autoveicoli e i produttori di dispositivi di post trattamento dei gas di scarico svilupparono il **VERT Project** attraverso l'applicazione della "*Swiss Ordinance on Air Pollution Control OAPC*" del governo svizzero. L'obiettivo era quello di valutare l'efficacia e l'affidabilità delle tecnologie disponibili, da applicare ai motori diesel, idonee per ridurre l'emissione di particolato (a livello del 98 %). Inizialmente il progetto VERT era stato indirizzato verso i motori per la propulsione delle macchine da costruzione, tra le quali quelle impiegate nelle miniere. Successivamente il suo campo di azione è stato esteso per includere anche i motori diesel impiegati per la propulsione degli autoveicoli.
In particolare, il progetto VERT ha sviluppato i criteri e le prove necessarie per valutare i filtri antiparticolato, risultati essere l'unica tecnologia attualmente disponibile in grado di abbattere in modo così spinto l'emissione del particolato.
Allo stato attuale la certificazione VERT è diventata uno standard di riferimento per stabilire se un particolare dispositivo filtrante posto sul mercato europeo possa essere ritenuto accettabile o meno. La certificazione richiede, in particolare, che siano eseguite dettagliate prove in laboratorio per verificarne le caratteristiche di filtrazione e la tendenza a formare emissioni secondarie. Basata sulla legislazione in vigore in Svizzera, le specificazioni tecniche e i criteri di valutazione hanno carattere dinamico, ossia devono essere aggiornati periodicamente per tenere conto dell'avanzamento della tecnologia.
I test effettuati su numerose famiglie di dispositivi nel corso degli anni ha messo in evidenza che non tutti i sistemi proposti sul mercato hanno soddisfatto le richieste dalla certificazione VERT e sono stati ritenuti inaccettabili.
Le prove di valutazione dell'efficienza di un filtro riguardano il controllo della risposta alla filtrazione in differenti condizioni operative del motore a regimi di moto stazionari e in transitorio. Le misure vengono effettuate su un esemplare, rappresentativo di una famiglia di dispositivi, sia nuovo che dopo averlo caricato con fuliggine, durante e dopo una rigenerazione e dopo un periodo di almeno 2000 ore di funzionamento in campo, durante il quale viene sottoposto a un continuo monitoraggio. Inoltre, per i dispositivi che impiegano rivestimenti o additivi catalitici nel combustibile, il protocollo VERT prevede anche il controllo di un'eventuale emissione di sostanze tossiche.
Il risultato di questo processo è stata la creazione di una lista di dispositivi commerciali di elevata qualità (*VERT Filter List*), etichettati con la *VERT Filter Label*, che hanno

superato il test. Questa lista è un documento ufficiale delle autorità svizzere BUWAL (*Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft*) e SUVA (*Schweizerische Unfallversicherungsanstalt*) e viene aggiornata periodicamente e resa pubblica sui seguenti siti web:

www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/fachgebiete/fg_luft/vorschriften/industrie_gewerbe/filter/

www.suva.ch/de/home/suvapro/branchen_fachthemen/partikelfilterobligatorium

L'ultimo aggiornamento, disponibile nelle quattro principali lingue della UE, è del dicembre 2006 (figura 16).



Fig. 16 – La copertina della ***VERT Filter List*** edizione italiana di dicembre 2006

I criteri di valutazione VERT di un filtro antiparticolato sono basati sulle specificazioni riportate nella tabella 2. Esse rappresentano i requisiti minimi richiesti per qualificare un sistema di filtrazione e devono essere accompagnati da specificazioni ulteriori che riguardano l'additivo catalitico nel combustibile, qualora previsto, e il sistema di diagnostica a bordo dell'autoveicolo (OBD).
La certificazione che completa la valutazione del sistema di filtrazione deve contemplare le caratteristiche di filtrazione e di emissione degli inquinanti secondari sotto tutte le possibili condizioni operative del motore (regime di rotazione, carico al motore) attese durante il suo funzionamento nell'applicazione a cui è destinato. Va notato che l'adattabilità del dispositivo di filtrazione a un particolare modello di motore e alle condizioni di carico a cui è soggetto nell'esercizio dell'autoveicolo su cui è equipaggiato non può essere dedotta a priori, ma deve essere basata sull'esperienza acquisita.
Il protocollo di prova per la valutazione di un sistema antiparticolato, schematizzato in figura 17, è suddiviso in quattro fasi distinte:

- **VFT1:** ***Prova di emissione di un esemplare nuovo su un motore al banco-freno.*** Questa prova viene eseguita in quattro condizioni di funzionamento del motore (regime di rotazione/carico) del ciclo di prova standard ISO 8178, alle condizioni operative stabilite di massima velocità spaziale [(1)] e di temperatura dei gas di scarico. Le misure sono effettuate in tre condizioni diverse: col dispositivo nuovo, dopo aver raggiunto il massimo carico di fuliggine raccolta e dopo un processo di rigenerazione del dispositivo. Le misure riguardano le emissioni regolamentate gassose e il particolato totale, il rapporto carbonio elementare / carbonio organico, il conteggio (concentrazione) delle particelle emesse nel campo di diametri di mobilità elettrica 20 –300 nm e l'area superficiale del particolato fine. Per il conteggio delle particelle viene impiegato un misuratore SMPS (TSI) associato a un *thermodenuder* per eliminare la frazione volatile, mentre per la misura durante un processo di rigenerazione si impiega lo strumento NanoMet in linea. Le prove sono completate con misure in condizioni di funzionamento del motore a regime dinamico e in accelerazione libera.

Tabella 2
Specificazioni VERT per i filtri antiparticolato

PARAMETRO	nuovo	dopo 2000 h
Efficienza di filtrazione (conteggio di particelle nel campo di dimensioni medie 20 –300 nm)	> 95 %	> 95 %
Efficienza di filtrazione (emissione in massa)	> 90 %	> 85 %
Opacità in accelerazione libera	< 0,12 m^{-1}	< 0,12 m^{-1}
Emissioni regolamentate (CO, HC, NOx e particolato)	nessuno incremento	
Emissione di inquinanti secondari	nessuna	
Opacità limite in verifiche di campo	> 0,24 m^{-1}	
Perdite di carico	max 200 mbar	
Monitoraggio in esercizio su strada	con sistemi di allarme e funzioni di rilevazione	
Attenuazione del rumore	paragonabile a quello del silenziatore di serie	
Durata	> 5000 h	
Identificazione unica	direzione del flusso indicata	
Sicurezza	in accordo con la legislazione svizzera STEG	
Accesso per il campionamento dei gas di scarico	a monte e a valle del filtro	
Procedura per la rimozione delle ceneri	definita e nota	

(1) Col termine di **velocità spaziale** si intende il volume di gas di scarico che attraversa il volume unitario del dispositivo di filtrazione nell'unità di tempo; si esprime in 1/secondi

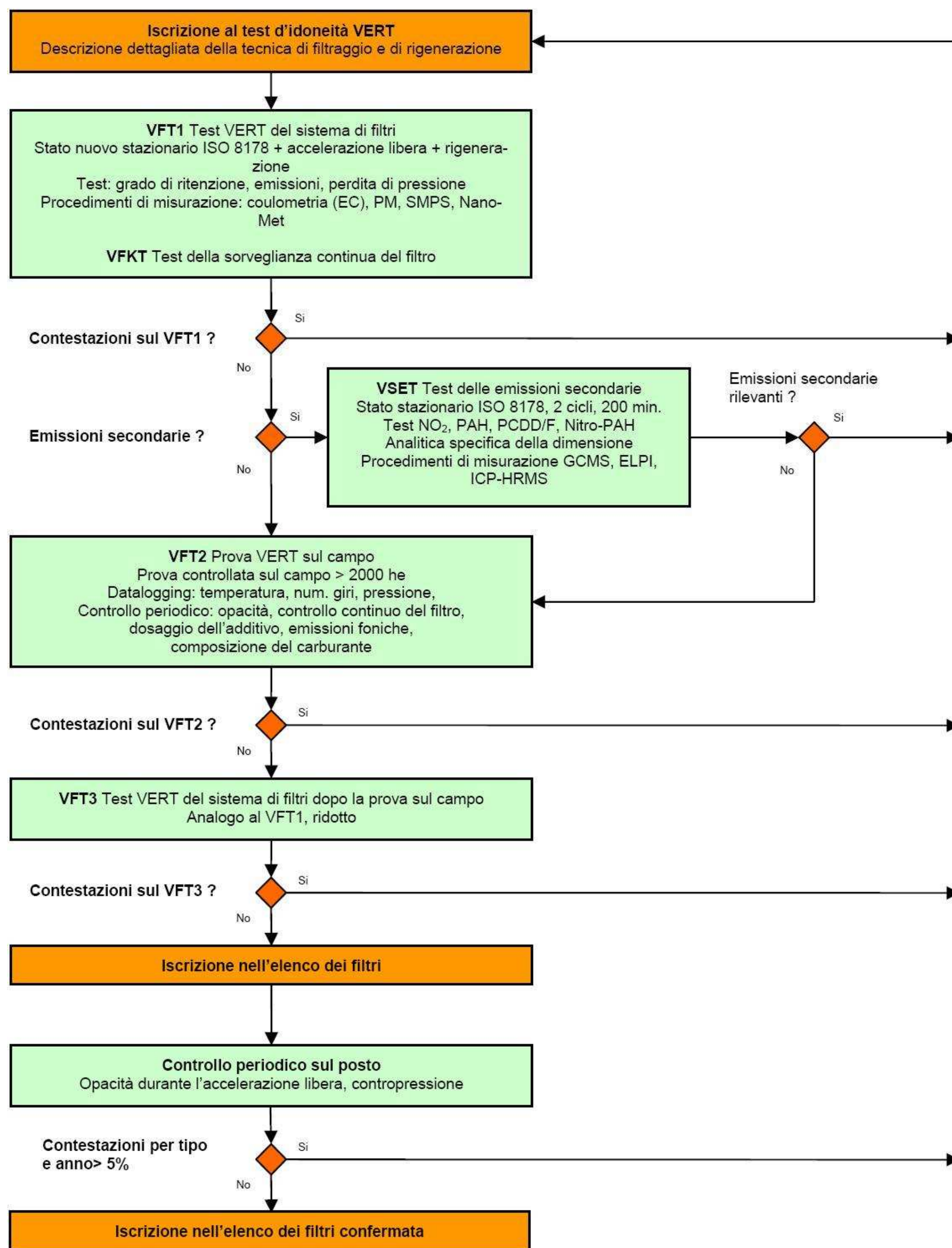


Fig. 17 – Schema del protocollo di prova VERT per la certificazione di un filtro antiparticolato

- **VSET:** ***Prova di controllo per le emissioni inquinanti secondari.***
  Il rilevamento di eventuali emissioni secondarie viene effettuato in tutti i punti di funzionamento del motore previsti dal ciclo di prova ISO 8178 C1.
  Sono previste misure di circa 150 sostanze diverse raggruppate nelle famiglie dei furani e N-furani, degli IPA e N-IPA, delle diossine, dei metalli e di altre specie tossiche presenti nel particolato e nelle sue frazioni dimensionali (limite di rilevamento = 0,01 μg/campione).
  Questa prova viene effettuata soltanto col dispositivo nuovo e quando la trappola impiega un catalizzatore o un additivo catalitico nel combustibile il cui elemento metallico che ne costituisce la fase attiva può depositarsi sulla superficie del filtro e attivare eventuali reazioni indesiderate. Negli altri casi l'opportunità di eseguire la prova va valutata di volta in volta in dipendenza delle caratteristiche del sistema di filtrazione in esame. Per i sistemi che impiegano additivi *fuel-borne* e nel caso in cui il consumo di olio lubrificante del motore è elevato si presume che sostanze tossiche possano essere originate durante la rigenerazione della trappola o prodotte per azione catalitica incontrollata sulla superficie del filtro. In alcuni casi si tiene conto anche che particelle metalliche prodotte dall'usura degli organi meccanici del motore e intrappolate nel particolato emesso possano avere un'azione catalitica indesiderata. Infatti, le ceneri derivate dagli additivi metallici e depositate sul substrato potrebbero gradualmente nel tempo modificare le proprietà della superficie del filtro.

- **VFT2:** ***Prova di campo controllata (prova di durata).***
  Questa viene eseguita con un esemplare del sistema di filtrazione in esame sigillato e montato su un autoveicolo di prova nel corso di almeno 2000 h di funzionamento nel normale esercizio su strada. Durante il periodo di prova deve essere eseguito con cura il monitoraggio continuo (frequenza di 1 s) della contropressione allo scarico e della temperatura dei gas di combustione tramite un *data logger*. Il test si conclude con misure di emissione (opacità dei gas di scarico) eseguite in accelerazione libera su strada.

- **VFT3:** ***Prova di laboratorio conclusiva.***
  Al termine della prova di durata il dispositivo si sottopone a una prova di verifica finale su un motore al banco-freno secondo una versione semplificata della prova VFT1.

Durante la prova in campo (VFT2) è necessario avere il monitoraggio continuo della temperatura dei gas di scarico e della contropressione, Questo consente di determinare la distribuzione statistica dei valori di questi due parametri e di accertare la presenza di eventuali anomalie intercorse nel corso della prova di campo. Un tipico esempio di diagramma di distribuzione della temperatura e della contropressione allo scarico è presentato nella figura 18.
I sistemi che hanno superato tutti i test previsti dal protocollo VERT sono caratterizzati da un'efficienza di filtrazione superiore al 98 %, anche dopo più di 2000 h di funzionamento del motore, confermando le buone caratteristiche di questi dispositivi in differenti condizioni di prova (carico/regime di rotazione del propulsore). In altri termini non c'è alcun effetto negativo legato all'"invecchiamento" del dispositivo di filtrazione nell'intercettare particelle fini e ultrafini (diametro medio 20 - 300 nm). Inoltre, una

trappola provata dal VERT su un determinato modello di motore si presta bene anche su motori di modello differenti, purché abbiano velocità spaziali (vedi nota a pagina 25) e livelli di temperatura dei gas di scarico simili.
Alcuni dispositivi proposti non hanno superato il test perché caratterizzati da una bassa efficienza di filtrazione per le particelle fini, pur presentando un'elevata capacità di trattenere quelle di dimensioni maggiori. La scarsa capacità di bloccare particelle fini (penetrabilità) può essere stata causata dall'impiego di materiali con pori molto grandi o con pareti sottili per costruire il substrato, oppure perché la velocità spaziale era elevata. In quest'ultimo caso, infatti, viene favorito il meccanismo di filtrazione per impatto inerziale che è caratteristico delle particelle di dimensioni maggiori, mentre regredisce il meccanismo per diffusione, tipico delle particelle ultrafini. Per questo motivo si ritiene che la misura dell'emissione del particolato totale effettuata soltanto con il metodo convenzionale gravimetrico nelle prove di laboratorio non è un parametro sufficiente per consentire di valutare accuratamente l'efficienza di un sistema di filtrazione.

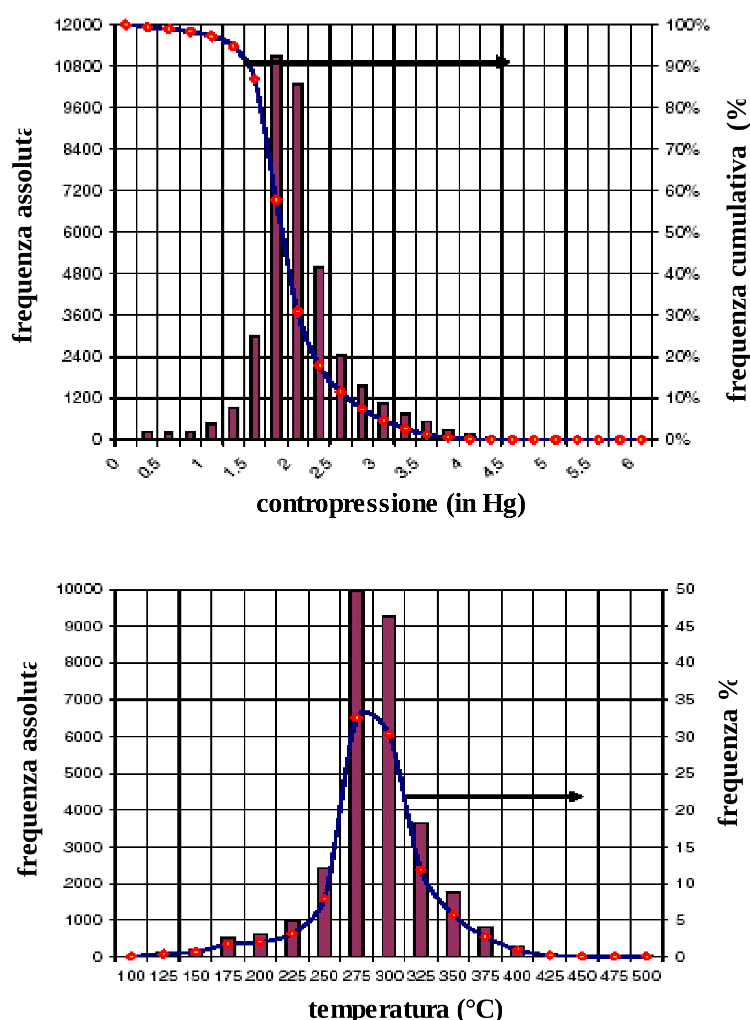


Fig. 18 – Distribuzione media dei valori della contropressione allo scarico e della temperatura dei gas di scarico registrati nel corso di un periodo di alcune settimane di esercizio di un autoveicolo diesel per il trasporto di rifiuti della città di New York dotato di una trappola antiparticolato

Secondo molti ricercatori un ulteriore motivo per ritenere insufficiente la sola misura gravimetrica dell'emissione del particolato per effettuare questa valutazione è connesso col fatto che nelle prove di laboratorio questo inquinante è campionato dopo un raffreddamento dei gas di scarico a temperature inferiori a 52 °C (diluizione con aria tramite il campionatore CVS), mentre è noto che le frazioni condensabili (sostanze organiche, solfati e acqua) sono normalmente presenti in fase gassosa quando i gas di scarico attraversano il filtro antiparticolato.
In definitiva una valutazione dell'efficienza del filtro basata solo sulla misura gravimetrica del particolato o soltanto sul conteggio delle particelle emesse dal motore può portare a una conclusione non corretta circa la bontà del dispositivo in esame, specialmente se hanno luogo fenomeni di condensazione nei gas di scarico campionati.
Tra i parametri di qualità previsti dal progetto VERT la frequenza dei guasti ai sistemi di filtrazione assume una determinata importanza, poiché questo parametro è indicativo dell'affidabilità nel tempo del sistema proposto. Il limite di accettabilità è stato stabilito su un valore inferiore al 2 % dei casi rilevati in *survey* periodiche su una flotta di autoveicoli in circolazione.
Le cause di danno ai sistemi di filtrazione rilevate più frequentemente nell'esercizio di autoveicoli sono presentate in tabella 3.
Un'analisi dettagliata dei guasti non è stata ancora fatta, ma i produttori dei filtri antiparticolato sono obbligati a tenere sotto controllo i loro prodotti e mantenere aggiornati annualmente i loro *report* statistici sui guasti rilevati. Se il tasso dei guasti supera il 3 % annuo, il costruttore è tenuto a intervenire per porre rimedio attraverso un'analisi tecnica del problema e migliorare il progetto del dispositivo. Se il tasso supera il 5 %, allora verrà ritirato il documento VERT di approvazione.
Come già discusso in un paragrafo precedente, un fenomeno inevitabile correlato con l'uso dei filtri antiparticolato è l'intasamento progressivo dei pori del corpo filtrante causato dall'accumulo delle ceneri che si originano dalla combustione, dal lubrificante e dall'abrasione delle parti meccaniche che costituiscono il motore. Secondo le specifiche del progetto VERT un filtro è accettabile se l'intervallo di pulizia dalle ceneri è superiore a 2000 h di funzionamento del motore, in modo che si possono prevedere tre a quattro interventi nel corso della sua vita.
Attualmente sono stati testati e approvati sulla base del protocollo VERT più di 30 sistemi di filtrazione prodotti da aziende multinazionali specializzate nel post-trattamento catalitico dei gas di scarico dei motori. Alcuni dei sistemi approvati risultano indicati soltanto per i mezzi di trasporto delle merci (truck), altri solo per autobus, altri ancora sono idonei per essere applicati solo sui motori di macchine per costruzione (strade, gallerie, miniere, ecc.).

3.4 Progetti sperimentali ed esperienze di campo

Nel corso degli anni novanta una serie di progetti sperimentali presero avvio in alcune località dei paesi dell'Europa Comunitaria e in altri paesi del mondo per prendere in considerazione la possibilità di applicare sistemi antinquinamento agli autoveicoli in circolazione con l'obiettivo di ridurre l'impatto causato dai trasporti sulla qualità dell'aria.
Le prime applicazioni in Europa di sistemi di filtrazione per ridurre l'emissione del particolato degli autoveicoli diesel pesanti risalgono alla fine degli anni '90. In quegli anni furono svolti alcuni progetti dimostrativi della durata variabile da alcuni mesi a oltre due anni, sotto il controllo delle autorità governative locali e delle aziende proponenti.

Soltanto alcuni dei progetti svolti avevano come obiettivo la verifica del mantenimento dell'efficienza nel tempo e si erano proposti di mettere in evidenza, con prove di laboratorio, gli eventuali problemi che potevano verificarsi nell'esercizio di autoveicoli adibiti a differenti tipologie di attività e nel funzionamento di macchine per costruzione. Altri programmi, invece avevano solo lo scopo di verificare l'adattamento di dispositivi antiparticolato su parti selezionate di flotte di autoveicoli diesel pesanti adibiti al trasporto pubblico urbano e al trasporto merci. Programmi del genere sono stati svolti in Germania (Berlino), Svizzera, Austria, Parigi, Londra, Svezia, New York, Odessa, California, Giappone, Corea del Sud (Seul).

Tabella 3
Principali cause di guasto per dispositivi di abbattimento del particolato

Tipo di guasto	Descrizione
Canali difettosi nel monolito	Il substrato del filtro si stacca e si distrugge per le vibrazioni meccaniche a cui è sottoposto.
Difetti nel materiale ceramico	Tendono a propagarsi nel tempo.
Incollamento di filtri segmentati e difetti del materiale	Conducono alla rapida distruzione del filtro se sottoposti a ripetute vibrazioni meccaniche.
Incidenti nel maneggio del substrato durante le operazioni di manutenzione/ispezione	Guasti di natura meccanica.
Errori di adattamento del sistema di filtrazione durante il montaggio sull'autoveicolo	Non sono eseguite con cura le operazioni prescritte dal produttore del sistema di filtrazione durante l'applicazione del dispositivo sul motore.
Errori operazionali accidentali quali, per es., l'impiego di combustibili non desolforati con sistemi catalitici	Anche in una sola occasione l'uso accidentale di un combustibile non desolforato può portare alla disattivazione dell'elemento catalitico di alcuni tipi di filtro con conseguente sovraccarico di fuliggine e incontrollate rigenerazioni a temperatura elevata: l'elemento filtrante si può distruggere per forti stress termici.
Situazioni in cui non sono raggiunte condizioni di termiche operative richieste per la rigenerazione del filtro	La trappola si sovraccarica di particolato e l'autorigenerazione può diventare incontrollata con conseguenti stress termici al materiale con cui è costruito: il guasto può verificarsi anche in un giorno in cui, per es., le condizioni di marcia nel traffico sono difficili.
Impiego su motori che presentano elevato consumo di olio lubrificante (> 2%)	La trappola si carica di materiale carbonioso che porta a un forte rilascio di calore durante la rigenerazione; la frequenza di pulizia dalle ceneri aumenta rapidamente nel tempo.
Guasti determinati durante operazioni prolungate nel tempo in condizioni non regolari di funzionamento	Sono più rari ma possibili: • trascuratezza dell'allarme segnalato dalla centralina elettronica di controllo di eccessiva contropressione allo scarico • incompleta eliminazione delle ceneri durante la manutenzione del sistema di filtrazione • manutenzione del motore poco accurata

Nel corso degli anni 2000 alcuni progetti originali svolti negli USA e in Europa sono stati successivamente consolidati. Sulla base delle esperienze condotte negli anni precedenti, l'ARB (*Air Resource Board*) ha sviluppato una procedura per la verifica dei filtri retrofit (*Retrofit Verification Procedure* - 2003), mentre negli USA l'EPA ha promosso a partire dall'anno 2000 una campagna volontaria (*Voluntary Diesel Retrofit Program*) con l'obiettivo ambizioso di adeguare (applicando filtri nuovi o sostituendo quelli già applicati) entro il 2015 gli oltre undici milioni di motori diesel presenti sul suo territorio con le tecnologie correntemente verificate e certificate dagli organismi preposti. In Europa il progetto VERT, nato e sviluppato in Svizzera, ha assunto un ruolo importante proponendosi come riferimento per gli altri paesi dell'Unione, quali la Germania e l'Austria.
Qui di seguito vengono riportati brevemente i risultati di alcuni progetti, in parte presentati in pubblicazioni scientifiche e in relazioni tecniche, mentre per una sintesi della casistica più ampia si fa riferimento al Documento N. 130 della *Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL).*

Programma sperimentale Johnson & Matthey (SAE Technical Paper 2000-01-0480)

Questo programma sperimentale aveva lo scopo di verificare l'efficienza del dispositivo noto col marchio commerciale CRT® (*Continuously Regenerating Trap* - sviluppato e prodotto dalla Johnson & Matthey) in prove di campo estese a differenti tipologie di autoveicoli equipaggiati con motore diesel. In totale erano stati considerati sette differenti autoveicoli non nuovi tra cui un locomotore di un treno intercity, tre autobus (uno urbano, uno extraurbano e uno adibito al trasporto viaggiatori aeroporto-città), tre autocarri (due compattatori per la nettezza urbana e un autoveicolo postale). Ciascun autoveicolo era stato equipaggiato con una trappola CRT® e aveva percorso alcune centinaia di migliaia di chilometri nel corso di diversi mesi di esercizio svolto secondo il servizio a cui era destinato. Gli autoveicoli e il treno erano in servizio nei paesi, quali la Svezia, la Germania e l'Inghilterra, che all'epoca avevano già disponibile sul mercato un gasolio con contenuto di zolfo inferiore a 50 mg/kg.
Le caratteristiche degli autoveicoli sono riportate nella tabella 4.
Una volta completato il periodo previsto di esercizio in campo i filtri CRT® furono disinstallati dagli autoveicoli e testati su un motore diesel (Euro 1 - 12 litri di cilindrata) al banco-freno secondo i cicli di prova standard europei a regimi di moto stazionari ECE R49 e ESC per determinare le emissioni inquinanti regolamentate (CO, HC, particolato). Quattro esemplari del dispositivo CRT® furono provati anche su un motore diesel (Euro 0 - 11 litri di cilindrata) secondo il ciclo dinamico standard europeo ETC e quello americano US HDT. Durante le prove i motori furono alimentati con un gasolio di tipo svedese con 2-4 mg/kg di zolfo.
I risultati delle prove svolte a regimi di moto stazionari avevano indicato che l'efficienza di abbattimento delle emissioni del sistema CRT® si era mantenuta sufficientemente elevata, superiore a 80 %, sia per i due inquinanti gassosi (dovuta alla presenza del catalizzatore ossidante posto a monte del filtro per la conversione del monossido di azoto a biossido) che per il particolato. Nelle prove svolte in condizioni dinamiche l'efficienza di abbattimento del particolato era risultata superiore al 95 %. Inoltre, non furono osservati fenomeni di deterioramento dei dispositivi CRT® provati al termine del lungo periodo di funzionamento su strada, né in alcuni casi era stato necessario intervenire per rimuovere le ceneri generate dal lubrificante. In definitiva il programma sperimentale aveva portato a concludere che il sistema proposto era caratterizzato da

un'elevata robustezza meccanica e da un'alta capacità di trattenere il particolato, anche dopo una lunga percorrenza dell'autoveicolo sotto condizioni di guida tipiche dei paesi europei.

Tabella 4
Caratteristiche degli autoveicoli equipaggiati con CRT® (progetto sperimentale J & M)

N	**tipo di veicolo**	**livello di omologazione**	**chilometraggio accumulato**	**periodo di esercizio**	**motore**	
			km	***mesi***	***cilindrata (l)***	***potenza (kW)***
1	treno intercity	Euro 2	~ 600.000	36	14	310
2	bus per aeroporto	Euro 0	> 575.000	57	10	210
3	bus extraurbano	Euro 2	> 490.000	35	10	265
4	furgone postale	Euro 0	> 473.000	63	7	170
5	bus urbano	Euro 0	> 228.000	46	11	187
6	compattatore	Euro 0	> 206.000	57	7	169
7	compattatore	Euro 0	> 105.000	37	7	169

Esperienze di campo svolte in Svizzera (SAE Technical Paper 2004-01-0076)

Le esperienze di campo in Svizzera riportate nel documento SAE erano strettamente connesse con il progetto VERT, iniziato nel 1993 e sviluppato in collaborazione con le autorità governative e con l'associazione mondiale dei produttori di sistemi di filtrazione (AKPF) e degli installatori. Esse coprirono un periodo di tempo di circa dieci anni, durante i quali furono applicati più di 6000 dispositivi diversi sia ai motori di macchine da costruzione adibite a lavori di grandi infrastrutture sul suolo (aeroporto di Zurigo, autostrade) e nel sottosuolo (costruzione di tunnel) che di autoveicoli. I sistemi di filtrazione applicati erano tutti approvati dal VERT, e la maggior parte caratterizzati da una efficienza di riduzione dell'emissione del particolato superiore al 99 %, sia quando erano nuovi che dopo più di 2000 h di funzionamento nelle condizioni operative tipiche delle macchine su cui erano stati installati. Prima del 2000 più del 10 % dei sistemi di filtrazione applicati e provati aveva subito danni meccanici o di stress termico. Nel 2003 la statistica basata sulle informazioni raccolte in parte dai produttori delle trappole per il particolato e dagli installatori e in parte da ispezioni di campo, aveva denotato una sensibile diminuzione del tasso di insorgenza di guasti a un valore inferiore al 2 %. Tutti i dispositivi che non avevano superato la prova di durata avevano perso la certificazione VERT acquisita in precedenza ed erano stati rigettati. In questo contesto col termine di "guasto" si intende un problema serio occorso alla trappola tale da pregiudicarne il funzionamento corretto e richiederne, quindi, la sua sostituzione. Il calo sull'occorrenza dei guasti denotava che nel corso del tempo i sistemi proposti erano stati soggetti a numerose migliorie da parte delle aziende produttrici. Nella tabella 5 viene riportato il quadro

delle caratteristiche dei dispositivi antiparticolato approvati entro l'anno 2003 e riportati nella *VERT Filter List*.

Tabella 5
Caratteristiche costruttive ed efficienza di riduzione dell'emissione del particolato dei sistemi di filtrazione per autoveicoli diesel pesanti approvati dal VERT fino al 2003

PRODUTTORE	**MODELLO**	**TIPO**	**AUTO-VEICOLO**		**ANNO CERTIF.**	**EFFICIENZA**	
			AC	**AB**		**VFT1 (nuovo)**	**VFT3 (>2000 h)**
ECS (UNIKAT) • elettrico in situ • filtro sostituibile	K18	IBIDEN SiC	x		2002	100,0	100,0
ECS (UNIKAT) • rivestimento catalitico	Purifilter	IBIDEN SiC	x	x	2003	100,0	100,0
HJS (UNIKAT) • NO_2 da oxycat	CRT®	Duratrap® CO	x	x	2002	99,4	98,7
JOHNSON MATTHEY • NO_2 da oxycat • FBC EOLYS (Ce)	CRT®	IBIDEN SiC	x x	x	2001	99,3	99,5
JOHNSON MATTHEY • NO_2 da oxycat • FBC EOLYS (Ce)	CRT®	Duratrap® CO	x x	x	2002	99,0	99,0
HUSS-Umwelttechnik • elettrico in situ	FxxS Series	IBIDEN SiC	x		2002	99,7	99,7
HUSS-Umwelttechnik • diesel burner	FS Filter Series	IBIDEN SiC	x		2003	100,0	100,0
INTECO • FBC Satacen	Ecopur Kxx yy	Bekipor®) ST (fibra di metallo)	x		2003	98,1	99,2
ARVINMERITOR • full-flow diesel burner	B-30	Duratrap® CO	x	x	2003	99,0	99,8
ENGELHARD • rivestimento catalitico • elettrico in situ	DPX1	Duratrap® CO	x	x x	2003	100,0	99,6
ENGELHARD • rivestimento catalitico • elettrico in situ	DPX2	Duratrap® CO	x x	x x	2003	99,8	99,8

AC = autoveicoli commerciali leggeri e pesanti **AB = autobus**

Le informazioni raccolte nel corso degli ultimi anni prima del 2003 avevano indicato che i sistemi applicati non manifestarono fenomeni di invecchiamento precoce né problemi di durata. Le ispezioni periodiche ai sistemi di scarico del motore, le verifiche sul consumo di olio lubrificante, il monitoraggio accurato della contropressione allo scarico erano stati eseguiti con cura. I risultati delle prove in campo consentirono di stabilire che se i controlli sul sistema di filtrazione e sul motore vengono effettuati con cura, secondo le prescrizioni del produttore, la vita media della trappola antiparticolato può eccedere anche 5.000 ore di funzionamento, sorpassando talvolta persino 25.000 ore, come è stato verificato in alcuni rari casi (autobus con più di 700.000 km e autocarri con più di 600.00 km di percorrenza).

Environmental Zones Program (Svezia)

Il programma, attuato con un decreto governativo, fu sviluppato circa dieci anni fa per far fronte alla necessità di ridurre quanto più possibile l'impatto del trasporto urbano sull'ambiente attraverso limitazioni alla circolazione degli autoveicoli diesel pesanti nei centri storici delle principali città svedesi (Stoccolma, Gotheborg, Malmö, Lund), definite "Zone Ambientali". I regolamenti applicati nelle "Zone Ambientali", tuttora validi, non sono armonizzati con gli standard di emissione dell'Unione europea.
Il primo regolamento (1 luglio 1996), modificato nel gennaio 2002, riguarda l'introduzione di misure specifiche idonee per tenere sotto controllo le emissioni del particolato, degli idrocarburi incombusti e degli ossidi di azoto per gli autoveicoli diesel pesanti (autobus e autocarri con più di 3,5 ton di peso). Le imposizioni del regolamento riguardano il divieto assoluto di circolazione nelle "Zone Ambientali" di autoveicoli con più di quindici anni di invecchiamento (dalla data di prima registrazione), mentre quelli con un'età compresa tra otto e quindici anni devono essere equipaggiati con dispositivi antinquinamento approvati e/o loro combinazioni per poter avere accesso alle suddette aree. I dispositivi approvati devono garantire una riduzione delle emissioni sufficientemente elevata da rispettare i limiti imposti (tabella 6) e nessun incremento di rumore.

Tabella 6
Requisiti richiesti dal regolamento svedese per i sistemi di riduzione delle emissioni inquinanti da impiegare come retrofit degli autoveicoli in circolazione nelle "Zone Ambientali"

Inquinante	**Riduzione dell'emissione**	
	Sistemi di tipo B	***Sistemi di tipo C***
Particolato	80 %	-
Idrocarburi incombusti	80 %	-
Ossidi di azoto	nessun incremento	35 %
Rumore	nessun incremento	
I sistemi di tipo "A" col 20% di riduzione del particolato erano permessi nella fase iniziale del programma. Dal 1999 il transito di questi autoveicoli nelle "Zone Ambientali" non è più permesso.		

Una volta nota la tipologia di un dispositivo o di più dispositivi combinati applicati all'autoveicolo le autorità competenti sono in grado di stabilire in quale periodo dell'anno questo può transitare nelle "Zone Ambientali" e per quanti anni ancora può circolare. La durata del periodo di permesso dipende anche dal modello dell'autoveicolo. Un autoveicolo di modello del 1993, per esempio, poteva transitare nelle "Zone Ambientali" fino al 2005 se equipaggiato con un sistema di tipo B, oppure potrà circolare fino alla fine del 2007 se dotato di sistema combinato di tipo B+C. Autoveicoli tecnologicamente più avanzati, omologati Euro 4 o Euro 5, hanno un permesso speciale.
I dispositivi approvati sono le trappole per il particolato associate con convertitori catalitici ossidanti che richiedono l'uso di combustibili diesel desolforati (< 10 mg/kg di zolfo). Il problema della disponibilità sul mercato svedese di gasolio a bassissimo tenore di zolfo non si pone. Infatti, più del 90 % degli autoveicoli pesanti circolanti in Svezia impiega già da diversi anni questo tipo di combustibile.
Inizialmente l'approvazione dei dispositivi era stata affidata al laboratorio MTC AB dello *Swedish Motor Vehicle Inspection Company ASB*. In seguito le autorità delle città coinvolte nel programma avevano modificato il regolamento per permettere che un qualsiasi laboratorio specializzato e accreditato potesse effettuare l'approvazione dei dispositivi proposti secondo un protocollo stabilito dalle autorità governative delle città. La documentazione inerente a un particolare dispositivo, contenente i risultati di prove di laboratorio e le istruzioni per l'installazione corretta sull'autoveicolo, associata a quella fornita dal produttore del dispositivo, viene preparata dal laboratorio incaricato. I documenti sono esaminati dagli Uffici competenti dei governi delle città che provvederanno a istituire una prova di emissione in simulazione di percorso su banco a rulli presso un laboratorio esterno su un esemplare degli autoveicoli su cui verrà montato il dispositivo. Il ciclo di guida adottato ufficialmente è il "*Braunschweig City Driving Cycle*" rappresentativo di un tipico percorso di un autobus o di un autocarro in ambiente urbano.
L'elenco dei dispositivi approvati fino all'anno 2000 secondo il regolamento svedese è presentato nella tabella 7.
Quando un dispositivo viene installato su un autoveicolo è soggetto a un'approvazione individuale da parte di una delle stazioni I&M dell'ASB. Questa provvederà ad applicare sul parabrezza dell'autoveicolo un'etichetta identificativa.
E' stato stimato che nel 2000 circa 3000 autoveicoli sono stati equipaggiati con dispositivi antiparticolato approvati nei primi tre anni dall'inizio del programma.
Il documento da cui è stata estratta la descrizione del progetto non riporta alcun commento a riguardo delle modalità di verifica della durata dei dispositivi approvati impiegati come retrofit sulle flotte di autoveicoli diesel in circolazione nelle "Zone Ambientali".

Progetto dimostrativo della città di New York per valutare la performance e la durata di dispositivi CRT® (SAE Technical Paper 2001-01-0511 e 2002-01-0430)

Il progetto dimostrativo "*Clean Diesel Demonstration Program*" fu attuato nel 1999 dal New York Transit, sotto la supervisione del Dipartimento della Conservazione dell'Ambiente (NYSDEC), nell'ambito del "*1996 Clean Water/Clean Air Bond Act*" con l'obiettivo di valutare le tecnologie che erano in grado di ridurre le emissioni degli autoveicoli diesel in ambito urbano.

Tabella 7
Elenco aggiornato all'anno 2000 dei dispositivi approvati dalle autorità svedesi da impiegare come retrofit per autoveicoli circolanti nelle "*Environmental Zones*"

Produttore	Codice	Identificazione prodotto	Potenza del motore (kW)	Codice di approvazione
Engine Control Systems	AZ 90 - V 18	Convertitore catalitico AZ90 + filtro V18 + dispositivo di pulizia "705002"	- 185	A 455/95
Eminox	EMZ-B96-20	EMZ-B96-20 a canali ceramici N. A 423/95	90 - 160	A 423/95
Eminox	EMZ-B96-30	EMZ-B96-30 a canali ceramici N. A 419/95	150 - 210	A 419/95
Eminox	EMZ-B96-40	EMZ-B96-40 a canali ceramici N. A 453/95	211 – 300	A 453/95
Eminox	EMZ-B96-50	EMZ-B96-50 a canali ceramici N. A 211/96	180 – 350	A 211/96
Eminox	EMZ-B96-60	EMZ-B96-60 a canali ceramici N. A 212/96	330 - 450	A 212/96
Engelhard Corporation	DPXplus Gen2 IV	Convertitore catalitico PTX 8565 + filtro DPX 8563	≤ 400	A 1/99
Engelhard Corporation	DPX Gen2 IV	Filtro DPX 8563	≤ 400	A 2/99
Engelhard Corporation	DPX1	Convertitore catalitico DPX 8585	≤ 147	A 10/00
Engelhard Corporation	DPX2	Convertitore catalitico DPX 8585 + filtro CCX 8586	≤ 147	A 11/00
Diesel Cleaning AB	DICAB-FC060W	"FC060W"	25 - 140	A 3/99
Diesel Cleaning AB	DICAB-FC108W	"FC108W"	35 - 230	A 368/98
Diesel Cleaning AB	DICAB-FC135W	"FC135W"	50 - 330	A 369/98

In particolare, l'interesse in quest'ambito era quello di verificare l'efficienza e la durata di filtri antiparticolato da applicare agli autobus in servizio nella città di N.Y. per renderli più compatibili con l'ambiente.
Il sistema di filtrazione provato era il CRT®, prodotto dalla J&M, costituito da una sezione catalitica ossidante e da una sezione filtrante. Esemplari di questo dispositivo furono installati su 25 autobus di uno stesso modello (DDC Series 50, motore di 8,5 litri

di cilindrata, turbocompresso) della rete urbana newyorkese. Gli autobus furono alimentati con un gasolio contenente meno di 30 mg/kg di zolfo. Le verifiche sul campo furono eseguite nel corso di più di un anno di esercizio su tre esemplari equipaggiati con un *data logger* per controllarne il comportamento a riguardo della riduzione delle emissioni e registrare gli eventuali problemi di funzionamento che si sarebbero eventualmente verificati. I controlli di campo sui tre esemplari selezionati avevano riguardato il monitoraggio della temperatura dei gas di scarico a monte del filtro antiparticolato e della contropressione alla scarico. Inoltre, furono valutati i parametri occupazionali e di manutenzione a confronto con quelli degli altri autobus del deposito. I controlli in laboratorio furono eseguiti su due dei tre autobus per misurare il livello delle emissioni inquinanti regolamentate e quello di alcune specie tossiche non regolamentate. La simulazione di percorso sul banco a rulli fu eseguita secondo due cicli di guida rappresentativi di condizioni di circolazione in città (*Central Business District* e *New York Bus*), sia all'inizio che alla fine del programma sperimentale in campo. Come riferimento furono considerati gli stessi esemplari di autobus nel loro allestimento originale, alimentati in questa configurazione sia con un gasolio convenzionale (tenore di zolfo ~250 mg/kg) che con quello a basso tenore di zolfo impiegato nelle prove di campo.
Le principali conclusioni del programma, basate sui risultati delle prove di laboratorio (tabella 8) e sulle osservazioni inerenti al comportamento in servizio degli autobus campione, sono riassunte brevemente di seguito.
L'applicazione del dispositivo antiparticolato CRT® aveva determinato:

- una riduzione superiore a 90 % delle emissioni di particolato totale e di ossido di carbonio e di oltre il 70% di quella degli idrocarburi incombusti anche dopo dodici mesi di funzionamento in condizioni di esercizio normale

Tabella 8
Riduzione percentuale delle emissioni di due autobus urbani del parco autoveicoli municipalizzati di New York equipaggiati con CRT® al termine del programma dimostrativo con riferimento al loro allestimento originale

Tipo di emissione	Inizio programma	Fine programma (> 70.000 km)
Particolato totale	72 – 93 %	86 – 91 %
Idrocarburi incombusti	100 %	65 %
Ossido di carbonio	87 – 94 %	84 – 89 %
Numero di particelle (30 - 6800 nm)	> 99 %	> 99 %
IPA	71 %	72 %
Nitro-IPA	70 %	87 %
Composti carbonilici	> 99 %	> 99 %
SOF	> 99 %	> 99 %
Carbonio organico	80 – 99 %	83 – 85 %
Carbonio elementare	99 %	99 %
Carbonio totale	94 – 99 %	96 %

- una riduzione di circa 90 % dell'emissione dei composti carbonilici, di 70-80% di quella degli IPA e superiore a 99 % per i VOC
- una riduzione compresa tra 90 e 99 % del numero di particelle emesse (misurato con l'apparecchiatura ELPI) nell'intervallo di diametri aerodinamici compreso tra 30 e 6800 nm
- un'elevata rimozione della frazione carboniosa oltre che della frazione organica solubile dedotta dall'analisi chimica del particolato raccolto durante le prove.

Non è stata osservata alcuna differenza nella riduzione delle emissioni determinata dal CRT® alimentando gli autobus nella configurazione originale una volta col gasolio convenzionale e una volta con quello a bassissimo contenuto di zolfo.
I controlli stradali avevano indicato che la contropressione allo scarico e la temperatura dei gas di combustione si erano mantenute stabili nel corso del periodo di prova denotando che il processo di rigenerazione dei filtri era rimasto regolare per circa 90.000 km percorsi durante oltre un anno di funzionamento in esercizio ordinario su strada.
Inoltre, i controlli sul consumo di combustibile non indicarono alcuna variazione apprezzabile rispetto ai valori di consumo registrati sugli altri autobus in servizio privi del dispositivo antiparticolato.

Programma sperimentale per valutare la performance e la durata di dispositivi CRT® su autoveicoli diesel in servizio nel Sud della California (SAE Technical Paper 2001-01-0512)

Il programma sperimentale, svolto tra il 1999 e il 2000 in collaborazione tra le agenzie locali e federali di protezione ambientale e il produttore del dispositivo, aveva riguardato la valutazione del comportamento di otto autoveicoli diesel campione selezionati tra trentadue esemplari dotati del dispositivo antiparticolato noto come CRT®. Gli autoveicoli adattati col CRT® appartenevano a otto tipologie di flotte in servizio in alcune città del sud della California. Le flotte erano costituite da scuolabus (San Diego), autocisterne per il trasporto di combustibili (ARCO), autocarri per trasporto merci e di servizio, autobus urbani ed extraurbani Transit. Nel corso del periodo di prova (un anno circa) gli autoveicoli avevano percorso tra 10.000 e 230.000 km circa in dipendenza della loro tipologia, alimentati con un gasolio commerciale a bassissimo tenore di zolfo (< 15 mg/kg), noto localmente come ECD (*Emission Control Diesel*).
Gli otto autoveicoli furono equipaggiati con un *data logger* per il monitoraggio in continuo della temperatura dei gas di scarico rilevata a monte del dispositivo antiparticolato e per il controllo della contropressione allo scarico.
Nelle prove di laboratorio, svolte con un laboratorio mobile dell'Università della West Virginia, furono misurate le emissioni inquinanti secondo il ciclo di guida più appropriato per il tipo di servizio cui era destinato l'autoveicolo in esame, selezionato tra cinque differenti modelli rappresentativi di diverse condizioni di guida.
I risultati, anche in questo caso, avevano indicato un comportamento soddisfacente del dispositivo antiparticolato. Infatti, gli autoveicoli esaminati avevano riportato un andamento regolare della frequenza di distribuzione dei valori della temperatura dei gas di combustione e della contropressione allo scarico registrati durante l'esercizio su strada. Ciò aveva indicato che la rigenerazione dei dispositivi CRT® era risultata sempre corretta. Inoltre, il consumo di combustibile non si era modificato in modo apprezzabile nel corso del periodo di prova su campo. Le oscillazioni sui valori osservate dipendevano

dal tipo di autoveicolo e dalle condizioni di esercizio durante il servizio. La riduzione del livello delle emissioni di ossido di carbonio, idrocarburi incombusti e particolato determinata dall'applicazione del filtro CRT® era compresa tra il 90 % e il 99 %, in dipendenza del tipo di autoveicolo provato. Anche l'efficienza di riduzione del particolato ultrafine era risultata elevata (99 %), come dedotto dalla misura dell'emissione del numero di particelle nell'intervallo dei diametri di mobilità elettrica compreso tra 10 e 300 nm, eseguita con un'apparecchiatura SMPS.

Progetto sperimentale in Los Angeles (SAE Technical Paper 2002-01-1722)

Il programma sperimentale, promosso dal CARB, aveva come obiettivo quello di fornire una rapida valutazione dell'impatto ambientale di autobus della flotta di autoveicoli diesel per il trasporto passeggeri della *Los Angeles County Metropolitan Transit Authority* (LAMTA) in tre differenti configurazioni (alimentazione a gas naturale, diesel con e senza filtro antiparticolato). Per le misure in laboratorio furono impiegati due esemplari di autobus selezionati dall'Azienda dei trasporti: uno equipaggiato con un motore 2000 DDC Serie 50G, privo di qualsiasi dispositivo di post-trattamento dei gas di scarico e alimentato con gas naturale, l'altro equipaggiato con un motore diesel 1998 DDC Serie 50 dotato di catalizzatore ossidante (*Nelson Exhaust System*), inizialmente nel suo allestimento originario e successivamente dopo l'applicazione di un dispositivo antiparticolato CRT® della J&M. L'autobus diesel fu alimentato durante le prove con il gasolio commerciale ARCO ADC-1 a bassissimo tenore di zolfo. I due autobus nelle tre configurazioni furono provati in quattro differenti condizioni di funzionamento, tra cui una condizione di marcia a velocità costante (SS = 55 miglia/h) e condizioni di guida secondo il ciclo *Central Business District* (CBD), il ciclo standard UDDS dell'EPA e il ciclo *New York City Bus* (NYCB) per determinare le emissioni inquinanti regolamentate.
I risultati del programma sperimentale misero in evidenza la forte dipendenza delle condizioni di guida sul livello di emissione delle specie inquinanti. La versione a metano dell'autobus aveva emesso mediamente una maggiore quantità di ossido di carbonio e di idrocarburi incombusti ma un ammontare più basso di ossidi di azoto e di particolato totale rispetto alla versione diesel equipaggiata con il solo catalizzatore ossidante in tutte le condizioni di guida. Viceversa, l'applicazione del sistema CRT® sull'autobus diesel aveva determinato una diminuzione sensibile delle emissioni dell'ossido di carbonio, degli idrocarburi incombusti e del particolato rispetto a entrambe le due versioni: diesel base (tabella 9) e a gas naturale.
Una delle osservazioni più interessanti fatte dall'analisi dei dati sperimentali è che, sebbene il livello di emissione degli ossidi di azoto rimaneva praticamente invariato tra le due configurazioni diesel, la presenza del catalizzatore ossidante del CRT® sul condotto di scarico determinava un incremento sensibile (circa 40 – 50 %) del rapporto percentuale biossido di azoto / monossido di azoto rispetto al valore trovato con la versione originale dell'autobus (NO_2/NO = 3 – 9 %).

Programma sperimentale ATM Milano per valutare la performance e la durata del dispositivo CRT® su autobus urbani

La sperimentazione, finanziata dal Comune di Milano e dal MATT, iniziò nel 2002 per valutare l'efficacia a medio termine di filtri antiparticolato di tipo CRT® della J&M applicati su 30 autobus della flotta ATM di Milano. Gli autobus convertiti erano di modello IVECO 491E.12.22 City Class con motore Fiat 8360.468 omologato Euro 2, alimentati con gasolio a bassissimo tenore di zolfo (< 10 mg/kg). L'obiettivo del programma

Tabella 9
Livello di emissione del particolato totale e sua riduzione percentuale determinata con l'applicazione del CRT® di un autobus urbano con propulsore diesel del parco autoveicoli municipalizzati di Los Angeles

Ciclo di guida	**PM totale (mg/mi)**		**% di riduzione**
	Diesel originario	***Diesel + CRT®***	
SS	23,3	3,43	87
CBD	119	14,2	88
NYBC	631	95,9	85
UDDS	90,6	16,6	81

sperimentale, svolto in collaborazione con EniTecnologie (ora ENI Divisione*Refining & Marketing*), era quello di verificare l'effetto del dispositivo CRT® sulle emissioni inquinanti a breve e medio termine (autobus equipaggiato con un filtro nuovo, dopo 20.000 km e 50.000 km di percorrenza) in condizioni di guida reale simulata su un banco a rulli. Il ciclo di guida selezionato era quello tipico della linea 61 che attraversa la città di Milano dalla periferia al centro storico.
I risultati del programma di prove in laboratorio, svolto su un autobus campione dotato del filtro antiparticolato nuovo a confronto con lo stesso nel suo allestimento originale e alimentato con lo stesso gasolio a bassissimo tenore di zolfo, avevano indicato una riduzione sensibile delle emissioni dell'ossido di carbonio, degli idrocarburi incombusti e del particolato comprese tra 90 e 95 %, confermando i risultati di altre sperimentazioni (Fig.19).

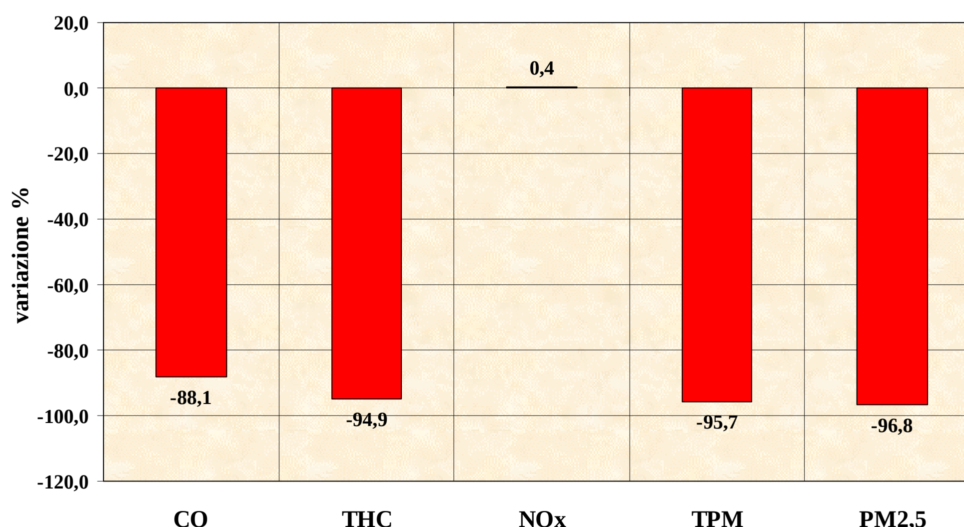


Fig. 19 – Variazione percentuale delle emissioni inquinanti determinate dall'applicazione del filtro antiparticolato CRT® sull'autobus urbano dell'ATM di Milano

Anche la frazione $PM_{2,5}$ del particolato emesso, che costituisce all'incirca l'85 - 90 % di quello totale secondo i dati di letteratura, aveva subito una drastica riduzione, prossima al 97 %. Nessuna variazione del consumo di combustibile fu riscontrata. I risultati delle prove ripetute dopo i due periodi di esercizio in normale servizio urbano corrispondenti rispettivamente a 20.000 e a 50.000 km circa di percorrenza, indicarono una lieve flessione sulla riduzione delle emissioni gassose (ossido di carbonio e idrocarburi incombusti), mentre il tasso di riduzione del particolato totale si era mantenuto su valori superiori a 90%. Nessuna variazione apprezzabile del valore della contropressione allo scarico fu osservata.

4. SELEZIONE DEI SISTEMI COMMERCIALI DI ABBATTIMENTO DEL PARTICOLATO EMESSO DAGLI AUTOVEICOLI DIESEL

In generale la selezione di un tipo di filtro antiparticolato è un processo complesso poiché occorre valutare con attenzione numerosi parametri connessi con le caratteristiche e col funzionamento dell'autoveicolo nelle sue normali condizioni di esercizio in cui è adibito. Un'analisi tecnico/economica del problema richiede di prendere in considerazione l'età dell'autoveicolo e l'aspettativa di vita residua, di stimare il livello di emissione del particolato, il tasso di consumo e il tipo di olio lubrificante impiegato, di valutare gli spazi disponibili per l'allocazione del dispositivo selezionato sull'autoveicolo, di accertarsi della disponibilità sul mercato di combustibili a bassissimo tenore di zolfo e, non ultimo, di considerare il costo di acquisto. Generalmente l'analisi e la valutazione dei costi/benefici si effettua tramite la compilazione di questionari specifici e dettagliati, appositamente predisposti.
La scelta di un particolare dispositivo antiparticolato disponibile sul mercato richiede anche la valutazione di fattori che sono generalmente a carico del produttore del sistema di filtrazione e dell'installatore. Le prescrizioni sull'installazione riguardano gli aspetti di sicurezza, il controllo dell'emissione della radiazione termica, la minimizzazione dell'estensione di superfici calde esposte, il controllo del livello di rumore e di vibrazioni, la limitazione della visibilità esterna e la buona accessibilità per la manutenzione.
Un'estesa trattazione dei criteri di selezione dei filtri, adottata dal BUWAL per la Svizzera, sono riportati nel Documento N. 130 della *Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape* (SAEFL).
Non sempre l'applicazione dei dispositivi antiparticolato a un parco autoveicoli risulta economicamente e tecnicamente conveniente. Secondo i suggerimenti degli organi tecnici svizzeri (BUWAL, TTM), basati sulle esperienze svolte nell'ambito del progetto VERT, gli autoveicoli non favoriti per essere equipaggiati con un filtro antiparticolato sono:

- quelli con più di 25 anni di vita
- quelli con elevato consumo di olio lubrificante
- quelli impiegati raramente
- quelli che non posseggono spazio sufficiente per l'alloggiamento del dispositivo
- quelli appartenenti a flotte poco numerose.

La tabella 10 riporta un estratto della VERT Filter List edizione 2006 riguardante tutti i sistemi di filtrazione approvati per l'applicazione come retrofit soltanto su autoveicoli commerciali leggeri e pesanti e per quello dei passeggeri (autobus).
Per dare rapidamente al lettore un'informazione concisa a riguardo dei sistemi di filtrazione, di seguito è riportata una breve descrizione, sotto forma di scheda tecnica, di alcune trappole presenti sul mercato, quasi tutte approvate secondo il protocollo VERT.
In molti casi le informazioni raccolte e riportate nelle schede tecniche dei singoli sistemi di filtrazione (descrizione e immagini originali o rielaborate) non sono sufficientemente esaurienti per la scarsità di materiale illustrativo e bibliografico disponibile. Questo è stato tratto in massima parte dalla consultazione dei siti web delle aziende produttrici. Data l'ampia varietà delle tecnologie di rigenerazione dei filtri, queste sono state sche-

matizzate come icone e riportate in ogni scheda. La chiave di lettura di queste icone è presentata nella figura 20.

Tabella 10
Caratteristiche dei sistemi di filtrazione approvati dal VERT da adottare come retrofit per gli autoveicoli diesel (estratto dalla VERT Filter List edizione dicembre 2006)

PRODUTTORE	MODELLO	SUBSTRATO	RIGENERAZIONE	AC	AB
ADASTRA - OCTEL	DPF	LiqTech SiC	• additivo satacen 3 (Fe) • additivo Octimax 3 (Fe)	X X	X X
AIRMEEX	CARMEX SC	IBIDEN SiC	• additivo Octimax 4810a	X	X
ARVINMERITOR	B-30	Duratrap® RC	• *full-flow* diesel burner	X	X
ATH	ATH-CAF	IBIDEN SiC	• bruciatore con veicolo fermo	X	X
BAUMÜLLER	BP-Partikelfilter	Setto in fibra di vetro	• smaltimento come rifiuto industriale	X	X
COMELA	EXOCLEAN	IBIDEN SiC	• valvola di scarico • combustione catalitica • additivo Eolys (Ce)	X X X	X X X
DEUTZ	DPFS/DPF	Duratrap® CO	• full-flow diesel burner	X	X
DINEX	DPX1 e DPX2	Duratrap® CO	• rivestimento catalitico	X	X
ECS (UNIKAT)	V	Duratrap® CO	• elettrico in situ • filtro sostituibile	X X	
ECS (UNIKAT)	K18	IBIDEN SiC	• elettrico in situ • filtro sostituibile	X X	
ECS (UNIKAT)	Purifilter	IBIDEN SiC	• rivestimento catalitico	X	X
EHC	HT	Fibra di vetro	• smaltimento come rifiuto industriale	X	X
EHC	L20	Fibra di vetro	• smaltimento come rifiuto industriale	X	X
EMINOX	DPF-CRT®	Duratrap® CO	• NO_2 da oxycat	X	X

AC = autoveicoli commerciali leggeri e pesanti **AB = autobus**

Continuo tabella 10

PRODUTTORE	MODELLO	SUBSTRATO	RIGENERAZIONE	AC	AB
EMINOX	DPF	LiqTech SiC	• additivo Octimax	X X	X X
ENDEAVOUR	Progetto Blu	Filtro in carta	• cartuccia in fibra di cellulosa	X	X
ENGELHARD	DPX1	Duratrap® CO	• rivestimento catalitico • elettrico in situ	X	X X
ENGELHARD	DPX2	Duratrap® CO	• rivestimento catalitico • elettrico in situ	X X	X X
ETB	EWR xx serie	Duratrap® CO	• elettrico esterno	X	
ETB	ECR xx serie	Duratrap® CO	• elettrico in situ	X	
GAT	Eurofilter	Duratrap® CO	• rivestimento catalitico	X	X
GREENTOP	Greentop SiK	IBIDEN SiC	• rivestimento catalitico • additivo Infineaum F7991 • additivo Eolys DPX 10	X X X	X X X
HJS / DES	CRT®	Duratrap® CO	• NO_2 da oxycat	X	X
HJS / DES	CRT® Bauart KM2	HJS filtro sinterizzato	• NO_2 da oxycat	X	X
HJS / DES	SMF®	metallo sinterizzato	• additivo satacen (Fe) • additivo Eolys (Ce)	X X	X X
HJS / DES	SMF-AR®	metallo sinterizzato	• additivo satacen (Fe) • additivo Eolys (Ce)	X X	X X
HUSS-Umweittechnik	SFA SKW	IBIDEN SiC	• elettrico in situ	X	
HUSS-Umweittechnik	SFA FS-MK	IBIDEN SiC	• diesel burner	X	X
HUSS-Umweittechnik	FS-ME	IBIDEN SiC	• elettrico in situ	X	
INTECO	ECOPUR Kxx yy	BEKIPOR® ST	• additivo satacen (Fe)	X	

AC = autoveicoli commerciali leggeri e pesanti **AB = autobus**

Continuo tabella 10

PRODUTTORE	MODELLO	SUBSTRATO	RIGENERAZIONE	AC	AB
JOHNSON & MATTHEY	CRT®	IBIDEN SiC	• NO_2 da oxycat. • additivo Eolys (Ce)	X X	X X
JOHNSON & MATTHEY	CRT®	Duratrap® CO	• NO_2 da oxycat. • additivo Eolys (Ce)	X X	X X
TSH	TSH-AK xx-yy	Ceramico	• rivestimento catalitico • termiventilatore potenziato	X	X
TSH	AWPF 312/310	Ceramico	• rivestimento catalitico • termoventilatore esterno	X X	X X

AC = autoveicoli commerciali leggeri e pesanti **AB = autobus**

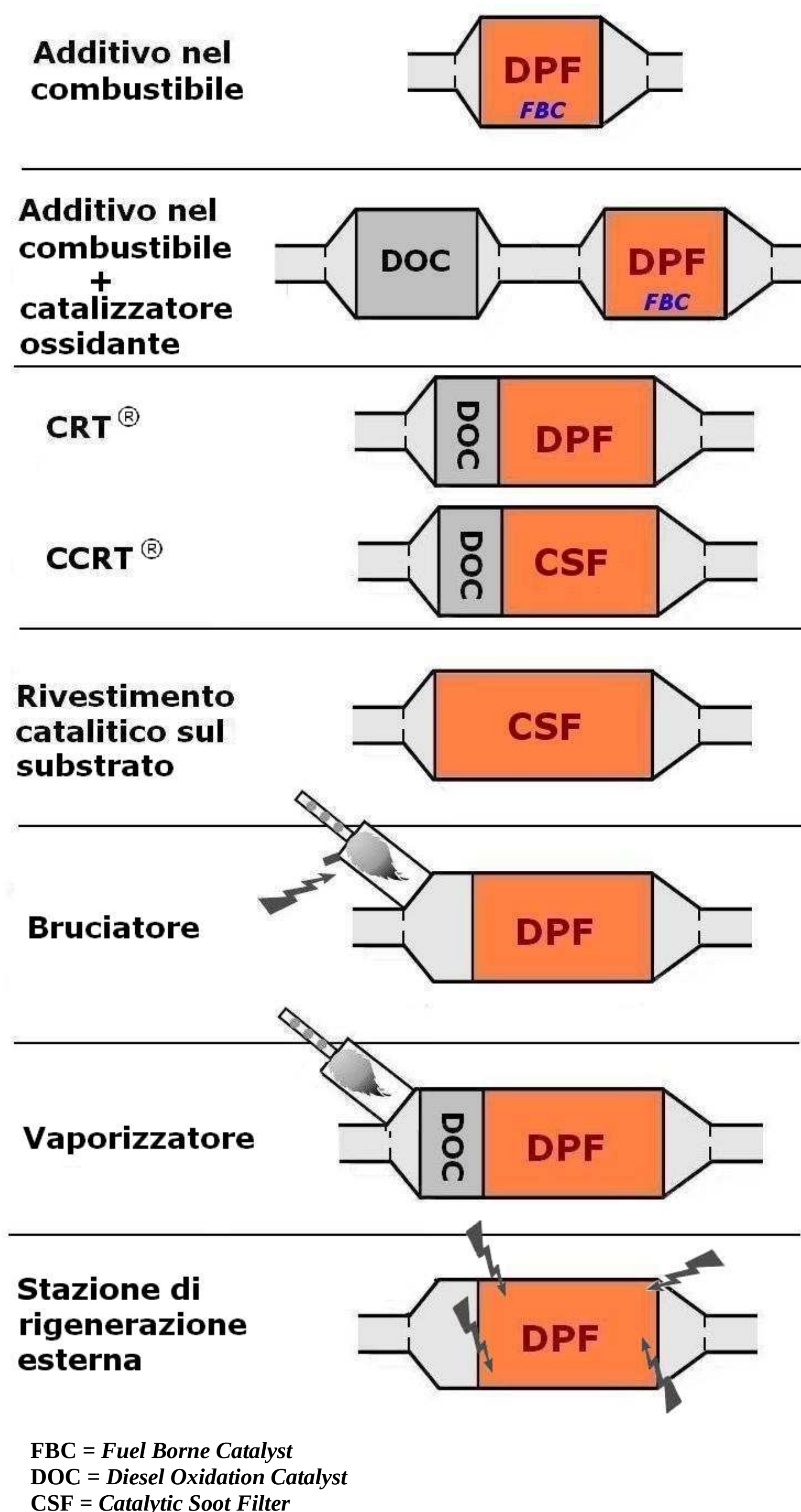


Fig. 20 – Le principali tipologie di rigenerazione dei filtri antiparticolato

Nome	**Octel Octimax™ / Satacen®**
Produttore	Adastra – Octel
Sito Web	http://www.adastra-dk.dk http://www.innospecinc.com/fuel_specialties/fuel_borne_catalysts.cfm
Meccanismo di rigenerazione	Additivo nel combustibile
Substrato di filtrazione	LiqTech SiC
Breve descrizione	Octimax™ (satacen® è il nome commerciale in Germania, Austria e Svizzera) è un additivo metallico a base di ferro solubile nel combustibile che abbassa la temperatura di combustione del *soot* a circa 250 °C. L'elemento che catalizza la reazione di combustione è il ferrocene ($C_{10}H_{10}Fe$). Si adatta a tutte le tipologie di autoveicoli e non è compatibile con lo zolfo presente nel combustibile. Durante il processo di combustione nel motore la porzione idrocarburica della molecola organo-metallica brucia, mentre la frazione metallica si trasforma in particelle di ossidi molto fini disperse nei gas di scarico e/o accumulate sul particolato. Durante la rigenerazione la coltre di fuliggine depositata sul filtro si ossida a temperature inferiori ai 600 °C grazie all'azione catalitica svolta dalle particelle di ossido metallico in essa contenute. Uno dei parametri importanti che permette la rigenerazione è il rapporto tra la quantità di additivo metallico e il *soot* nel particolato depositato sul filtro. Poiché la quantità di particolato emesso non è direttamente proporzionale al consumo di combustibile, il dosaggio dell'additivo non può essere relazionato con questo parametro. Tuttavia è stato dimostrato che un dosaggio costante porta a risultati soddisfacenti nella rigenerazione, poiché il sistema di filtrazione "media" i diversi regimi di funzionamento del motore. Il sistema in oggetto non richiede una misura accurata della quantità di combustibile nel serbatoio, ma inietta nella linea di alimentazione del combustibile, o su quella di ritorno, una dose stabilita di additivo in modo controllato tale da aumentare o diminuire la concentrazione di additivo in dipendenza della velocità dell'autoveicolo. Prove sperimentali hanno dimostrato come la rigenerazione del filtro sia assicurata in qualsiasi condizione di funzionamento del motore. L'additivo Octimax™ è utilizzato per la rigenerazione catalitica di diversi tipi di trappole, come quelle prodotte da **Adastra** e da **Dinex** (http://www.dinex.dk)
Certificazione VERT	SI
Riferimenti bibliografici	SAE Technical Paper N. 2005-01-0375 SAE Technical Paper N. 2005-01-0669

Nome	**Full-Flow Burner DPF (bruciatore diesel in pieno flusso)**
Produttore	Arvin Meritor
Sito Web	http://www.arvinmeritor.com/
Meccanismo di rigenerazione	Rigenerazione attiva mediante bruciatore
Substrato di filtrazione	Corning DuraTrap ™ RC
Breve descrizione	Si tratta di un sistema di rigenerazione di tipo attivo, adattabile agli autoveicoli per i quali la temperatura dei gas di scarico e/o il rapporto NOx/*soot* sono troppo bassi per una rigenerazione di tipo passivo. Nel sistema in esame vengono misurate in continuo la temperatura dei gas di scarico e la contropressione allo scarico. Questi dati, integrati con altri parametri motoristici (velocità, carico, ecc.) vengono elaborati dall'unità di controllo che gestisce la rigenerazione del filtro. Al momento opportuno una quantità esigua di combustibile prelevata dal serbatoio dell'autoveicolo viene iniettata e bruciata in una piccola camera di combustione posta in prossimità del filtro. La combustione del gasolio iniettato, attivata tramite una coppia di elettrodi, innalza la temperatura dei gas di scarico fino al valore di autocombustione della coltre di fuliggine raccolta sul corpo filtrante. Per la combustione del gasolio nella cavità viene impiegata aria compressa prelevata da una piccola bombola a bordo dell'autoveicolo. In questo modo, indipendentemente dalle condizioni di funzionamento del motore e, quindi, dalla concentrazione di ossigeno residuo nei gas di scarico, il bruciatore lavora sempre con un eccesso d'aria, producendo una fiamma priva di *soot*.
Certificazione VERT	SI – Prove superate: VFT1 – VFT2 – VFT3
Riferimenti bibliografici	SAE Technical Paper N. 2002-01-2787

Nome	**Diesel Fuel Vaporizer**	
Produttore	Arvin Meritor	
Sito Web	http://www.arvinmeritor.com/	
Meccanismo di rigenerazione	Vaporizzatore + catalizzatore ossidante (DOC)	DOC DPF
Substrato di filtrazione	SiC	
Breve descrizione	Il dispositivo descritto è un vaporizzatore di gasolio impiegato per la rigenerazione di filtri antiparticolato associati a un catalizzatore ossidante (DOC). Al momento delle rigenerazione il dispositivo inietta a monte del catalizzatore ossidante una quantità modesta di combustibile diesel prelevandola dal serbatoio dell'autoveicolo. La quantità di combustibile iniettata è regolata in modo da assicurare l'ossidazione completa del combustibile nel DOC. La reazione, fortemente esotermica, incrementa localmente la temperatura dei gas di scarico fino al valore tipico dell'autocombustione del *soot* accumulato sul filtro. Il dosaggio di combustibile è controllato dalla centralina elettronica del sistema tramite un sensore di temperatura posto a valle del DOC. Il vaporizzatore è costituito da un piccolo serbatoio dove il combustibile iniettato evapora. I vapori passano successivamente nel condotto di scarico attraverso un diffusore. Il sistema è relativamente piccolo e di conseguenza si integra facilmente in ogni sistema di scarico. Un altro vantaggio è che il vaporizzatore permette di ridurre la dimensione della trappola antiparticolato, poiché la rigenerazione si verifica con frequenza elevata. Il layout ideale è costituto da un pre-convertitore ossidante accoppiato col filtro, e dal vaporizzatore collocato sufficientemente distante per favorire la diffusione dei vapori di gasolio.	
Certificazione VERT	NO	
	DPF DOC VAPORIZZATORE	
Riferimenti bibliografici	SAE-NA Technical Paper N. 2003-01-50	

Nome	**ExoClean™**
Produttore	COMELA (in collaborazione con Rhodia)
Sito Web	http://www.piroux.com http://www.rhodia-ec.com
Meccanismo di rigenerazione	Rigenerazione attiva mediante iniezione di gasolio sul catalizzatore
Substrato di filtrazione	SiC Ibiden
Breve descrizione	Il sistema di filtrazione è caratterizzato dalla modularità della superficie filtrante e dall'elevato isolamento termico. Il corpo filtrante è composto da due a sei cartucce di SiC impaccate in un involucro termicamente isolato, che vengono attraversate totalmente o solo in parte dai gas di scarico in dipendenza della potenza erogata del motore durante l'esercizio dell'autoveicolo. Infatti, una parte delle cartucce può essere isolata tramite un sistema di valvole comandate (EOVS) dalla centralina di controllo del motore. L'elevato isolamento termico consente di mantenere calde le parti del corpo filtrante, indipendentemente se utilizzate o meno, e di facilitare l'ossidazione delle particelle carboniose che si raccolgono sulle cartucce. L'impiego di un catalizzatore ossidante associato all'iniezione e alla combustione di una piccola quantità di gasolio sulla sua superficie permette di mantenere costantemente caldo l'ambiente per avere una rigenerazione quasi continua del filtro. E'stato trovato, inoltre, che l'uso dell'additivo Eolys a base di cerio nel gasolio può migliorare la *performance* del sistema, poiché abbassa la temperatura di autocombustione della fuliggine e modera nello stesso tempo l'esotermicità della reazione, parametro importante per mantenere integro il filtro nel tempo.
Certificazione VERT	SI – Prove superate: VFT1 – VFT2 – VFT3 – VSET
Riferimenti bibliografici	SAE Technical Paper N. 2004-01-1937

Nome	**UNIKAT Combifilter V e K Purifilter™**
Produttore	ECS (Engine Control Systems)
Sito Web	http://www.unikat.se/
Meccanismo di rigenerazione	Stazione di rigenerazione esterna (per il modello Combifilter) Rivestimento catalitico sul filtro (per il modello Purifilter™)
Substrato di filtrazione	Cordierite (per Combifilter V), SiC (per Combifilter K e Purifilter)
Breve descrizione	Combifilter e Purifilter™ sono due sistemi integrati costituiti entrambi da un silenziatore e dal filtro antiparticolato. Essi differiscono per la modalità di rigenerazione: attiva per il primo, passiva per il secondo. La rigenerazione del modello Combifilter avviene collegando l'autoveicolo a un dispositivo di rigenerazione esterno (stazione di rigenerazione). La rigenerazione viene effettuata giornalmente, mentre l'autoveicolo non è in funzione, e dura mediamente otto ore. Il modello V è indicato per condizioni di basso carico del motore, mentre il modello K è più adatto per condizioni di funzionamento più irregolari e gravose. L'intervallo di rigenerazione è di circa otto ore. Nel modello Purifilter™ il monolito ceramico è rivestito con un catalizzatore ossidante supportato da allumina che consente di abbassare la temperatura di autocombustione del particolato a circa 320 °C. Il rivestimento catalitico favorisce anche l'ossidazione degli idrocarburi incombusti e del monossido di carbonio. Il filtro può essere equipaggiato, inoltre, con un riscaldatore elettrico come ulteriore dispositivo per favorire la combustione del particolato quando la temperatura dei gas di scarico non raggiunge il valore limite di 320 °C nelle normali condizioni di esercizio dell'autoveicolo. E' richiesto l'utilizzo di gasolio a basso tenore di zolfo (max. 50 mg/kg) per non pregiudicare l'efficienza della trappola.
Certificazione VERT	SI – Prove superate: VFT1 – VFT2 – VFT3 – VSET (solo Purifilter)
	Il modello Combifilter
Riferimenti bibliografici	Non trovati

Nome	**Modular CRT® System**
Produttore	HJS – Partner di Johnson & Matthey
Sito Web	http://www.hjs.com/
Meccanismo di rigenerazione	1. CRT® 2. Rigenerazione attiva mediante riscaldatori e additivo nel combustibile
Substrato di filtrazione	1. CORNING DuraTrap™ CO 2. Filtro metallico sinterizzato in acciaio al cromo-nichel
Breve descrizione	Il sistema modulare HJS CRT® propone come supporto di filtrazione il modulo SMF®, costruito in metallo sinterizzato in alternativa al substrato ceramico tradizionale. E' un sistema innovativo che, oltre ad un'efficienza di filtrazione del 99 %, ha il vantaggio di avere una elevata capacità di accumulo delle ceneri e una migliore distribuzione del flusso dei gas di scarico all'interno del filtro: come risultato la manutenzione del filtro si effettua meno frequentemente. Inoltre l'elasticità metallica del filtro previene eventuali danneggiamenti dovuti alle elevate temperature che si raggiungono durante la rigenerazione. Il sistema SMF® prevede una rigenerazione di tipo attivo che combina l'uso di un additivo ossidante (satacen o Eolys) nel combustibile con l'energia termica radiante proveniente da tre resistenze elettriche che circondano il filtro. Queste assicurano un incremento locale di temperatura estremamente rapido. L'aumento di temperatura dei gas di scarico sul filtro dura solo un minuto, un tempo sufficiente per completare la rigenerazione.
Certificazione VERT	SI – Prove superate: VFT1 – VFT2 – VFT3 – VSET
Riferimenti bibliografici	SAE Technical Paper N. 2005-01-0669

Nome	**PCRT™ Partial Filter Technology (PFT)**
Produttore	Johnson Matthey ECT / Emitec Inc.
Sito Web	http://www.emitec.com
Meccanismo di rigenerazione	Ossidazione con NO_2
Substrato di filtrazione	PM-Metalit
Breve descrizione	Il dispositivo è una combinazione di un catalizzatore ossidante e di un filtro a flusso parzialmente libero (*Flow-Through Filter*) che riduce l'emissione del particolato fino a 70 %. Il sistema combina le caratteristiche di un substrato a flusso libero con quelle di un filtro con flusso a parete. Con questa tecnica solo una parte consistente del particolato emesso viene trattenuta per evitare l'intasamento precoce del filtro. La parte rimanente dei gas di scarico fluisce liberamente. La trappola PFT impiega il principio di rigenerazione continuo tipico del sistema CRT®, basato sull'ossidazione del particolato con NO_2. Dal punto di vista strutturale il filtro PFT è costituito da un substrato metallico fatto di fogli lisci e corrugati, su cui sono allocati deviatori di flusso che convogliano una parte dei gas di scarico verso le pareti del filtro. Questo è costruito in metallo sinterizzato, in grado di trattenere il *soot* che si deposita e si ossida reagendo con l'NO_2 generato nel catalizzatore. Il filtro risulta, quindi, una struttura parzialmente aperta che garantisce un funzionamento regolare del motore anche in caso di rigenerazione insufficiente.
Certificazione VERT	NO
Riferimenti bibliografici	SAE Technical Paper N. 2001-01-1950 SAE Technical Paper N. 2005-01-0471 SAE Technical Paper N. 2006-01-0213 SAE Technical Paper N. 2006-01-1523

Nome	**DNOx™ (LPL EGR)**
Produttore	Johnson Matthey CSD / SST Emtec AB
Sito Web	http://www.sttemtec.com/
Meccanismo di rigenerazione	Ossidazione con NO_2
Substrato di filtrazione	Materiali tipici come SiC, cordierite e materiali metallici sinterizzati
Breve descrizione	Il sistema è una combinazione di un sistema EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) a bassa pressione e di un filtro antiparticolato che permette una riduzione simultanea delle emissioni degli NOx e del particolato. L'EGR ha la funzione di ricircolare una porzione dei gas di scarico in camera di combustione del motore per ridurre l'emissione degli NOx. In questo modo, infatti, si riduce la concentrazione di O_2 e si abbassa il picco di temperatura di combustione introducendo composti assorbitori di calore quali CO_2 e H_2O. L'effetto finale è una minore emissione di NOx. Nel sistema in esame il gas di ricircolo viene prelevato a valle della trappola di particolato e raffreddato per aumentare la capacità di assorbire calore. Il filtro impiegato è del tipo CRT® della J&M, con rigenerazione continua tramite ossidazione della fuliggine con NO_2, prodotto sul catalizzatore ossidante posto a monte della trappola. L'ammontare di NO_2 necessario a ossidare il *soot* dipende dalla temperatura dei gas di scarico e dalla velocità con cui il *soot* si deposita.
Certificazione VERT	SI – Prove superate: VFT1 – VFT2 – VFT3 – VSET
Riferimenti bibliografici	SAE Technical Paper N. 2002-01-2780 SAE Technical Paper N. 2003-01-0048

Nome	**DPX™ 1 e 2**	
Produttore	Engelhard	
Sito Web	http://www.engelhard.com/	
Meccanismo di rigenerazione	Rivestimento catalitico sul filtro	CSF
Substrato di filtrazione	CORNING DuraTrap™ CO e altri tipi di materiali	
Breve descrizione	Il filtro DPX™ è costituito da un substrato a nido d'ape su cui è depositato un *wash-coat* a base di allumina contenente platino con nota attività catalitica per favorire l'ossidazione del particolato durante la rigenerazione. Per la sua realizzazione può essere utilizzata ogni tipologia di supporto disponibile sul mercato, tra cui la cordierite, il carburo di silicio e metallo sinterizzato. I primi esemplari prodotti su scala industriale, che risalgono al 1993, prevedevano un'elevata concentrazione del metallo prezioso nel *wash*-coat. Attualmente, dopo svariate generazioni, questo tipo di filtro prevede come fase attiva una combinazione di platino e di ossidi metallici. I miglioramenti tecnologici apportati hanno permesso di abbassare ulteriormente la temperatura di autocombustione del particolato durante la rigenerazione. In tale condizione questa trappola si adatta per essere utilizzata in sistemi che prevedono una rigenerazione sia di tipo passivo che attivo. Il filtro catalitico DPX™ è stato impiegato su decine di migliaia di autobus e autoveicoli commerciali in tutto il mondo senza problemi perché non necessita di assistenza o di interventi operativi da parte del conducente. Il filtro richiede l'utilizzo di un gasolio a basso contenuto di zolfo, per evitare l'avvelenamento del catalizzatore. Il filtro DPX è utilizzato anche nel sistema **DiPEX** prodotto dalla **Dinex** (http://www.dinex.dk).	
Certificazione VERT	SI – Prove superate: VFT1 – VFT2 – VFT3 – VSET	
Engelhard's DPX™ Dual function catalyst: Precious Metal + catalytic base metal oxide Catalyst applied directly to soot filter substrate DPX™ CSF 1. Filter C (soot) 2a. $NO + {}^1/_2 O_2 \rightarrow NO_2$ 2b. $MO_{X-1} + {}^1/_2 O_2 \rightarrow MO_X$ 3a. $NO + NO_2 \rightarrow CO + NO$ 3b. $C + MO_X \rightarrow CO + MO_{X-}$ 4. $CO + {}^1/_2 O_2 \rightarrow CO_2$		
Riferimenti bibliografici	SAE Technical Paper N. 2000-01-2815 SAE Technical Paper N. 2003-01-1887	

Nome	**MK (modulare – combustibile)** **ME (modulare – elettrico)** **MA (modulare con additivi)**
Produttore	Huss – Humwelttechnik Gmbh
Sito Web	*http://www.huss-umwelt.com/*
Meccanismi di rigenerazione	Attiva con bruciatore (MK) o mediante riscaldamento elettrico (ME) Con additivo nel combustibile (MA)
Substrato di filtrazione	SiC
Breve descrizione	I filtri modulari sono strutture di tipo convenzionale (monolito) che differiscono tra loro per la tecnologia di rigenerazione adottata. I filtri MK effettuano l'ossidazione della fuliggine attraverso la combustione, mediante un bruciatore, di una piccola quantità di gasolio prelevata dal serbatoio dell'autoveicolo. La rigenerazione del filtro avviene a motore fermo (durante la pausa notturna, per es.) e dura da 8 a 30 minuti a seconda della potenza dell'autoveicolo e, quindi, della dimensione dell'elemento filtrante. L'aria di combustione necessaria alla combustione del gasolio viene fornito mediante una soffiante posta su un canale laterale del corpo del filtro. I filtri MK si rigenerano attraverso il riscaldamento elettrico del filtro, senza smontarlo dall'autoveicolo. Anche in questo caso la rigenerazione, che dura circa 1 ora, viene effettuata a motore fermo. I filtri MA sono strutturalmente simili a quelli delle due serie precedenti, ma la rigenerazione avviene attraverso l'aggiunta di un additivo nel combustibile di alimentazione del propulsore.
Certificazione VERT	SI (MK e ME) – Prove superate: VFT1 – VFT2 – VFT3
Il modello MA	
Riferimenti bibliografici	Non trovati

Nome	Filtro W (Sistema a filtri intercambiabili)
Produttore	Huss
Sito Web	http://www.huss-umwelt.com/
Meccanismo di rigenerazione	Stazione di rigenerazione DPF
Substrato di filtrazione	SiC
Breve descrizione	Il sistema W a filtri intercambiabili è costituito da componenti installati sull'autoveicolo e da una stazione di rigenerazione esterna. La rigenerazione, in questo caso, è decisa dall'autista che è informato costantemente sul valore della contropressione allo scarico (e quindi anche sul riempimento volumetrico della cartuccia) mediante l'indicazione fornita da un manometro posto nella cabina di guida. Al raggiungimento del valore di soglia della contropressione la cartuccia viene rimossa dall'alloggiamento in cui si trova (a motore fermo) e sostituita con una precedentemente rigenerata. Dopo questa operazione l'autoveicolo è pronto per un nuovo ciclo di servizio. La stazione di rigenerazione esterna ha la funzione di ricevere e rigenerare una cartuccia carica di fuliggine. La rigenerazione avviene innalzando per circa 60 minuti la temperatura nella stazione fino a portare a combustione lo strato di *soot* trattenuto.
Certificazione VERT	SI – Prove superate: VFT1 – VFT2 – VFT3
Riferimenti bibliografici	Non trovati

Nome	**Filtro per particolato**
Produttore	Pirelli Ambiente
Sito Web	http://www.pirelliambiente.com
Meccanismo di rigenerazione	Additivo nel combustibile
Substrato di filtrazione	SiC
Breve descrizione	Il sistema di filtrazione è costituito da un monolito in SiC alloggiato in un silenziatore di acciaio inossidabile. La rigenerazione avviene tramite l'ausilio di un composto organometallico a base di ferro dosato automaticamente come additivo nel gasolio contenuto nel serbatoio dell'autoveicolo. L'additivo, a sua volta, è contenuto in un serbatoio specifico montato a bordo dell'autoveicolo. Il dosaggio medio di additivo è di circa 1000 ppm (0,1%), a cui corrisponde una concentrazione di ferro < 20 ppm, sufficientemente bassa per limitare la formazione di ceneri. Il produttore del filtro prevede ogni 10.000 - 20.000 km un controllo periodico della contropressione allo scarico e un eventuale rabbocco dell'additivo nel suo serbatoio. La manutenzione periodica del filtro (per un autobus ogni 45.000 km circa), necessaria per eliminare le ceneri accumulate, viene effettuata attraverso il riscaldamento del corpo filtrante a un temperatura intorno ai 650 °C per un paio di ore e successivamente nell'aspirazione/soffiaggio delle ceneri.
Certificazione VERT	Non ancora disponibile
Riferimenti bibliografici	Non trovati

Nome	**Progetto Blu**	
Produttore	Endeavour – Ahlstrom Turin	
Sito Web	Non trovato	
Meccanismo di rigenerazione	Nessuno	
Substrato di filtrazione	Filtro di cellulosa	
Breve descrizione	Il filtro è costituito da una cartuccia usa e getta in fibra di cellulosa, piegata a greca e con un inserto di cartone ondulato in ogni cella. Il dispositivo comprende anche uno scambiatore di calore per abbassare la temperatura dei gas di scarico tra 110 e 130 °C prima dell'ingresso nel filtro. In tali condizioni si prevede che il filtro possa trattenere anche le fasi condensabili contenute nei gas di scarico, costituite da sostanze organiche, tra cui gli IPA. La percorrenza di un autobus medio prima che si renda necessaria la sostituzione del filtro varia tra 3000 e 6000 km, in dipendenza del livello di emissione del particolato.	
Certificazione VERT	SI – Prove superate: VFT3	
ALCUNA IMMAGINE DISPONIBILE		
Riferimenti bibliografici	Non trovati	

GLOSSARIO

ACEA	Association des Constructeurs Européenne de l'Automobile
AECC	Association for Emissions Control by Catalyst
AKPF	Working Group of Trap Manufacturers
ARB	Air Resouce Board
BPT	Balance Point Temperature
BUWAL	Bundesampt für Umwelt, Wald Und Landschaft
CARB	California Air Resource Board
CORNING	Produttore di substrati e costruttore di filtri (USA)
CRT®	Continuously Regenerating Trap
DEER	Diesel Engine Emissions Reduction
DEUTZ	Costruttore di motori diesel e produttore di filtri (Germania)
DMPS	Differential Mobility Particulate Sizer
DOC	Diesel Oxydation Catalyst
DPF	Diesel Particulate Filter
ECU	Electronic Control Unit
EDC	Emission Control Diesel (gasolio a bassissimo tenore di zolfo californiano)
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor
EMA	Engine Manufacturer Association
EMITEC	Produttore di filtri (Germania)
EOLYS	Additivo *fuel-borne* a base di Ce e/o Ce/Fe prodotto da Rodia
ESC	European Standard Cycle
ETC	European Transient Cycle
FBC	Fuel-Borne Catalyst
HD	Heavy-Duty (di motore, di autoveicolo)
HDT	Heavy-Duty Transient (ciclo di prova dinamico americano)
HJS	Produttore di filtri (Germania)
IARC	Istituto Internazionale di Ricerca sul Cancro
IBIDEN	Produttore di substrati e costruttore di filtri (Giappone)
INFINEUM	Produttore di additivi per combustibili (Inghilterra)
IPA	Idrocarburi Policiclici Aromatici
N-IPA	Idrocarburi Policiclici Nitro-Aromatici
JMC	Johnson & Matthey Catalyst – Produttore di filtri (USA)

LIEBHERR	Costruttore di motori diesel, macchine da costruzione (Svizzera)
MAN	Costruttore di motori diesel e autoveicoli commerciali (Germania)
MANN & HUMMEL	Produttore di filtri (Germania)
MECA	Manufacturers of Emission Control Association
NEXTEL	Marchio commerciale di fibra ceramica prodotta da 3M (USA)
NO	Ossido di azoto
NOTOX	Produttore di filtri (Danimarca)
NO_2	Biossido di azoto
OBD	On-board Diagnostic
OCTEL	Produttore di additivi per combustibili (Germania)
OEM	Original Equipment Manufacturers
PIRELLI	Produttore di filtri (Italia)
PFT	Partial Filter Technology
RODIA	Produttore di additivi per combustibili (Francia)
SATACEN	Additivo *fuel-borne* a base di Fe prodotto da Octel
SAE	Society of Automotive Engineers
SCR	Selective Catalytic Reduction System (sistema de-NOX ad ammoniaca)
SCRT	Combinazione di una trappola per particolato col sistema de-NOx SCR
SEM	Scanning Electron Microscopy
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
SHW	Produttore di filtri (Germania)
SOF	Soluble Organic Fraction (frazione organica solubile del particolato)
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
UBA	Deutsches Umweltbundesampt (EPA tedesco)
UFAM	Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
ULS	Ultra-Low Sulphur (combustibile a bassissimo tenore di zolfo)
TTM	Technik Thermische Maschinen (Svizzera) (Laboratorio di prove)
UNIKAT	Produttore di filtri (Svezia)
VERT	Verminderung der Emissionen von Real-Dieselmotoren im Tunnelbau (Progetto svizzero per la riduzione delle emissioni dai motori diesel)

DOCUMENTAZIONE BIBLIOGRAFICA CONSULTATA

Documentazione generale

[1] T.V. Johnson – *Diesel Emission Control in Review* – SAE Technical Paper N. 2006-01-0030 (2006)

[2] J.R. Warner, J.H. Johnson, S.T. Bagley, C.T. Huynh – *Effects of a Catalysed Particulate Filters on Emissions from a Diesel Engine: Chemical Characterization Data and Particulate Emissions Measured with Thermal Optical and Gravimetric Methods* – SAE Technical Paper N. 2003-01-0049 (2003)

[3] H. Persiko, E. Sher – *Evaluation of Various Strategies for Continuous Regeneration of Particulate Filters* – SAE Technical Paper N. 2001-01-1945 (2001)

[4] V. Kati, V. Annele, M. Jyrki, K.Jorma – *Effects of After-Treatment System on Size Distribution of Heavy-Duty Diesel Exhaust Aerosol* – SAE Technical Paper N. 2004-01-1980 (2004)

[5] M.D. Rumminger, X. Zhou, K. Balakrishnan, B.L. Edgar – *Regeneration Behaviour and Transient Thermal Response of Diesel Particulate Filters* – SAE Technical Paper N. 2001-01-1342 (2001)

[6] J. Gieshoff, M. Pfeifer, A. Schäfer-Sindlinger, U. Hackbarth, O. Teysset, C. Colignon, C. Rigaudeau, O. Salvat, H. Krieg, B.W. Wenclawiak – *Regeneration of Catalytic Diesel Particulate Filters* – SAE Technical Paper N. 2001-01-0907 (2001)

[7] C.Y. Liang, K.J. Baumgard, R.A. Gorse Jr, J.E. Orban, J.M.E. Storey, J.C. Tan, J.E. Thoss, W. Clark – *Effects of Diesel Fuel Sulphur Level on Performance of a Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter and a Catalysed Particulate Filter* – SAE Technical Paper N. 2000-01-1876 (2000)

[8] R. Allansson, C.A. Maloney, A.P. Walker, J.P. Warren – *Sulphate Production over the CRT®: What Fuel Sulphur Level is required to Enable the EU 4 and EU 5 PM Standards to be Met?* – SAE Technical Paper N. 2000-01-1875 (2000)

[9] R.J. Locker, N. Gunasekaran, C. Sawyer – *Diesel Particulate Filter Test Methods* – SAE Technical Paper N. 2002-01-1009 (2002)

[10] A. Mayer, N. Heeb, J. Czerwinski, M. Wyser – *Secondary Emissions from Catalytic Active Particle Filter Systems* – SAE Technical Paper N. 2003-01-0291 (2003)

[11] A.G. Konstandopoulos – *Update on Diesel Particulate Emission Control: Catalytic Filter Technologies and On-Board Monitoring* – International Conference on Euro V – Milano 10-11 dicembre 2003

[12] G. Muntean – *The State of the Science in Diesel Particulate Control* – Diesel Engine Emissions Reduction Conference (DEER 2005), 25 agosto 2005

[13] G. Guo, N. Xu, P.M. Laing, R.H. Hammerle, M. Matti Maricq – *Performance of a Catalysed Diesel Particulate Filter System During Soot Accumulation and Regeneration* – SAE Technical Paper N. 2003-01-0047 (2003)

[14] A. Mayer, N. Heeb, J. Czerwinski, M. Wyser – *Secondary Emissions from Catalytic Active Particle Filter Systems* – SAE Technical Paper N. 2003-01-0291 (2003)

[15] S. Chatterjee, R. Conway, S. Wiswanathan, M. Blomquist, B. Klüsener, S. Andersson – *NOx and PM Control from Heavy Duty Diesel Engines Using a Combination of low Pressure EGR and Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter* – SAE Technical Paper N. 2003-01-0048 (2003)

[16] W.S. Wayne, R.D. Nine, N.N. Clark, M. Gautam, P. Moynihan, T. Balon, M. Chiaromonte, M. Prostakov – *Reduction of PM Emissions from Refuse Trucks through Retrofit of Diesel Particulate Filters* – SAE Technical Paper N. 2003-01-1887 (2003)

Catalizzatori Fuel-Borne

[17] G. Blanchard, C. Colignon, C. Griard, C. Rigaudeau, O. Salvat, T. Seguelong – *Passenger Car series Application of a New Diesel Particulate Filter System Using a New Ceria-Based Fuel-Borne Catalyst: From the Engine Test Bench to European Vehicle Certification* – SAE Technical Paper N. 2002-01-2781 (2002)

[18] G. Blanchard, T. Seguelong, J. Michelin, S. Schuerholz, F. Terres – *Ceria-Based, Fuel-Borne Catalyst For Series Diesel Particulate Filter Regeneration* – SAE Technical Paper N. 2003-01-0378 (2003)

[19] E.R. Fanick, J.M. Valentine – *Emissions Reduction Performance of a Bimetallic Platinum/Cerium Fuel-Borne Catalyst with Several Diesel Particulate Filters on Different Sulphur Fuels* – SAE Technical Paper N. 2001-01-0904 (2001)

[20] P. Richards, M.V. Vincent, J. Chadderton – *Service Application of a Novel Fuel Borne Catalyst Dosing System for DPF Retrofit* – SAE Technical Paper N. 2005-01-0669 (2005)

[21] *Diesel Particulate Filter Maintenance: Current Practices and Experience* – Documento MECA (Manufacturers of Emission Controls Association), giugno 2005, disponibile sul sito web: http://www.meca.org

[22] *Retrofitting Emission Controls On Diesel-Powered Vehicles* – Documento MECA (Manufacturers of Emission Controls Association), aprile 2006, disponibile sul sito web: http://www.meca.org

[23] M.W. Vincent, P.J. Richards, D.J. Catterson – *A Novel Fuel Borne Catalyst Dosing System for Use with a Diesel Particulate Filter* – SAE Technical Paper N. 2003-01-0382 (2003)

[24] P. Richards, B. Terry, D. Pye – *Demonstration of the Benefits of DPF/FBC Systems on London Black Cabs* – SAE Technical Paper N. 2003-01-0375 (2003)

[25] P. Richards, M.W. Vincent, J. Chadderton – *Service application of a Novel Fuel Borne Catalyst Dosing System for DPF Retrofit* – SAE Technical Paper N. 2005-01-0669 (2005)

Documentazione sul progetto VERT

[26] A. Mayer, J. Czerwinski, F. Legerer, M. Wyser – *VERT Particulate Trap Verification* – SAE Technical Paper N. 2002-01-0435 (2002)

[27] A. Mayer, J. Czerwinski, J.-L. Pétermann, M. Wyser, F. Legerer – *Reliability of DPF-Systems: Experience with 6000 Applications of the Swiss Retrofit Fleet* – SAE Technical Paper N. 2004-01-0076 (2004)

[28] A. Mayer, J. Czerwinski, L. Matthews T. Mosimann – *Filtration of Diesel Soot Nanoparticles and Reliability in Swiss HDV Retrofitting* – SIAT 2005 – Documento disponibile sul sito web: http://www.akpf.org/pubs.html

[29] *Particulate Traps for Heavy-duty Vehicles* – Environmental Document N. 130 – Air – Sweiss Agency for the Environmernt, Forests and Landscape (SEFL), 2000 - Documento disponibile sul sito web: www.akpf.org/pub/bericht_um130_en.pdf

[30] A.C.R. Mayer – *Ultraclean Diesel Exhaust by Particle Traps* – Documento ppt del BUWAL/TTM disponibile sul sito web: www.akpf.org/pub/2004_mayer_santiago.pdf

[31] A. Mayer – *PFS – News 2006* – Documento ppt del TTM disponibile sul sito web: http://www.akpf.org/pubs.html

[32] *VERT Filter List – Tested and Approved Particle-Trap Systems for Retrofitting Diesel Engines* – Documento SUVAPRO e SAEFL (giugno 2003)

[33] *Filterliste BAFU/Suva Geprüfte und erprobte Partikelfilter Systeme für die Nachrüstung von Dieselmotoren. Stand: Mai 2006* – Documento SUVAPRO/BAFU (maggio 2006)

[34] *Elenco dei filtri UFAM/Suva – Sistemi di filtri antiparticolato collaudati e sperimentati per il post-equipaggiamento di motori diesel. Stato: dicembre 2006* – Documento SUVAPRO/BAFU (dicembre 2006)

Sistemi di filtrazione

[35] R. Allansson, B.J. Cooper, J.E. Thoss, A. Uusimäki. A.P. Walker, J.P. Warren – *European Experience of High Mileage Durability of Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter Technology* – SAE Technical Paper N. 2000-01-0480 (2000)

[36] L. Pace, R. Konieczny, M. Presti – *Metal Supported Particulate Matter-Cat, A low Impact and Cost Effective Solution for the Fiat 1.3 JTD Euro IV Engine* – SAE Technical Paper N. 2005-01-0471 (2005)

[37] R. Brück, P. Hirth, M. Reizig, P. Treiber, J. Breuer – *Metal Supported Flow-Through Particulate Trap: a Non-Blocking Solution* – SAE Technical Paper N. 2001-01-1950 (2001)

[38] R. Brück, P. Hirth, R. Konieczny – *The PM-Metalit™, Experience With the Bypass-flow Particulate Trap with Regard to the Reduction of Particulate Number and mass for Passenger Car and Truck Applications* – marzo 2006 – Documento disponibile sul sito web: http://www.emitec.de

[39] *VERT Filter Test, Phase 3 with the Lubrizol Engine Control System - UNIKAT DPF K17 on the Liebherr D914T Construction Engine* – documento del TTM Svizzero (novembre 2002)

[40] *Sinterized Metal Particulate Filters to Meet EPA 07 Life Cycle Requirements for Commercial Vehicles* – documento PUREM disponibile sul sito web http://www.purem.de

[41] M. Syed – *The ExoClean™ Filter System for "Stop & Go" Duty Cycle Vehicles: Experience, Durability and Improvements* – Diesel Engine Emissions Reduction Conference (DEER 2005), Chicago 21-25 agosto 2005

[42] *Clean City buses have a name: Modular CRT® system silent e clean* – Documentazione illustrativa disponibile sul sito web http://www.hjs.com

[43] *New Filter Technology or Diesel Engines: Sintered Metal Filter SMF®* – Documentazione illustrativa disponibile sul sito web http://www.hjs.com

[44] *Emission Control Solutions for Heavy Duty Diesel Engine On-Road Applications* – Documento disponibile sul sito web: http://www.engelhard.com

[45] *DPX™ Filtro par Particolato da Motori Diesel* – Documento disponibile sul sito web: http://www.engelhard.com

[46] *Tecnologie per la riduzione delle emissioni da veicoli diesel - Applicazione Retrofit* – Documento disponibile sul sito web: http://www.engelhard.com

[47] T. Jacobs, P S. Chatterjee, R. Conway, A. Walker, J. Kramer, K. Mueller-Hass – *Development of Partial Filter Technology for HDD Retrofit* – SAE Technical Paper N. 2006-01-0213 (2006)

[48] M. Presti, L. Pace, G. Carelli, P. Spurk – *Turbulent Flow Metal Substrates: a Way to address Cold Start CO Emissions and to Optimize Catalyst Loading* – SAE Technical Paper N. 2006-01-1523 (2006)

[49] T. Sequelong, J.-C. Fayard – *A New DPF System for Duty Cycle Vehicles* – SAE Technical Paper N. 2004-01-1937 (2004)

[50] *Innovazioni EMITEC* - Documento disponibile sul sito web: http://www.emitec.com/index.php?lang=it&mid=i4&doc=52

[51] *Purifilter™ Diesel Particulate Filter (DPF)* - Documento della Lubrizol Engine Control Systems disponibile sul sito web: http://www.lubrizol.com/enginecontrol oppure sul sito web: http://www.unikat.se

[52] *Emissions Control – a History of Clean Air Solutions* - Documento della ArvinMeritor disponibile sul sito web: http://www.arwinmeritor.com

[53] P. Zelenka, C. Telford, D. Pye, N. Birkby – *Development of a Full-Flow Burner DPF System for Heavy Duty Diesel Engines* – SAE Technical Paper N. 2002-01-2787 (2002)

[54] A Mayr, J. Clement, M. Ranalli, S. Schmidt – *Diesel Fuel Vaporizer: a Way to Reliable DPF Regeneration* – SAE-NA Technical Paper N. 2003-01-50 (2003)

[55] M. Ranalli, S. Schmidt, L. Watts – *NOx-Particulate Filter (NPF): Evaluation of an After-Treatment Concept to Meet Future Diesel Emission Standards* – SAE Technical Paper N. 2004-01-0577 (2004)

[56] M. Ranalli, S. Schmidt – *Diesel Fuel Vaporiser – Path to a Reliable Regeneration* – MTZ worldwide N. 9, **65** (2004)

[57] *W-Filter (Exchange Filter System)* – Documentazione illustrativa disponibile sul sito web http://www.huss-umwelt.de/en/w.html

[58] *EHC PF - Filtro catalitico per particolato per gas di scarico Diesel* – Documentazione illustrativa disponibile sul sito web http://www.ehcteknik.com

[59] *EHC HT – for engines with continuous driving* – Documentazione illustrativa disponibile sul sito web http://www.ehcteknik.com/engelska/ehcht.htm

[60] *Filtro catalitico per particolato per motori Diesel Pirelli Ambiente* – Documentazione illustrativa disponibile sul sito web http://www.pirelliambiente.com

[61] K. Aravelli, J. Jamison, K. Robbins, N. Gunasekaran, A. Heibel – *Improved Lifetime Pressure Drop Management For DuraTrap® RC Filters With Asymmetric Cell Technology (ACT)* – Diesel Engine Emissions Reduction Conference (DEER 2006), Detroit 20-24 agosto 2006

Esperienze di campo

[62] T. Lanni, C. Bush, D. Lowell, S. Chatterjee, R. Conway, H. Windawi, J. Evans, D. Rosenblatt, R. McLean – *Performance and Durability Evaluation of Continuously Regenerating Diesel Particulate Filters on Diesel Powered Urban Buses at NY City Transit* – SAE Technical Paper N. 2001-01-0511 (2001)

[63] S. Chatterjee, R. Conway, C. Bush, D. Lowell, D. Rosenblatt, J. Evans, R. McLean, T. Lanni, B. Frank, S. Tang, S.J. Levy – *Performance and Durability Evaluation of Continuously Regenerating Diesel Particulate Filters on Diesel Powered Urban Buses at NY City Transit – Part II* – SAE Technical Paper N. 2002-01-0430 (2002)

[64] S. Chatterjee, C. Mc Donald, R. Conway, H. Windawi, K. Vertin, C.A. LeTavec, N.N. Clark, M. Gautam – *Emission reductions and Operational Experiences with Heavy Duty Diesel Fleet Vehicles Retrofitted with Continuously Regenerated Diesel Particulate Filters in Southern California* – SAE Technical Paper N. 2001-01-0512 (2001)

[65] P Richards, B. Terry, D. Pye – *Demonstration of the Benefits of DPF/FBC Systems on London Black Cabs* – SAE Technical Paper N. 2003-01-0375 (2003)

[66] A. Ayala, N.Y. Kado, R.A. Okamoto, B.A. Holmén, P.A. Kuzmicky, R. Kobayashi, K.E. Stuglitz – *Diesel and CNG Heavy-duty Transit Bus Emissions over Multiple Driving Schedules: Regulated Pollutants and Project Overview* – SAE Technical Paper N. 2002-01-1722 (2002)

[67] Sweden Environmental Zones Program (Truck and Buses) - documento disponibile sul sito web: http://www.dieselnet.cm/standards/se/zones.html

[68] P. Ahlvik – *Summary of Swedish Experiences on CNG and "Clean" Diesel Buses* – Diesel Engine Emissions Reduction Conference (DEER 2003), Newport 24-28 agosto 2003

[69] N.N. Clark, J.E. Boyce, W. Xie, M. Gautam, D.W. Lyons, K. Vertin, C.A. Le Tavec, T.C. Coburn – *Class 8 Trucks Operating On Ultra-Low Sulfur Diesel with Particulate Filter Systems: Regulated Emissions* – SAE Technical Paper N. 2000-01-2815 (2000)

[70] *Connecticut School Bus Retrofit Program Vendor Requirements and Expectations* - Documento della Lubrizol Engine Control Systems disponibile sul sito web: http://www.lubrizol.com/enginecontrol